はじめに

平成 23 年度 24 年度に引き続き、専門学校　国際情報工科大学校では平成 25 年度文部科学省「東日本大震災からの復興を担う専門人材育成支援事業」に取り組んできました。この事業は、福島県・宮城県・岩手県の教育機関を中心に公的機関や企業など、産官学が連携し、復興活動の即戦力となる人材育成プログラムを開発する事業です。本校が受託した「放射線の知識を持つ測定技術者の育成及び計測支援事業」の具体的な事業内容は、県内の放射線測定技術者への講習会の実施、中長期の教育カリキュラム（履修要項や授業計画）の作成です。さらに今年度は教科書と映像の教材の開発も加え、より充実した成果を目指して事業を進めてきました。

東日本大震災により、東北地方の太平洋沿岸は甚大な被害が発生しました。そして震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故に起因した放射性物質の影響は、福島県民の生活を一変させました。県外に避難している県民は約 13 万人おり、警戒区域に指定された町村の約 6 万人の県民はふるさとに帰れないでいます。ほとんどの県民は放射線量を気にかけ、放射線被ばくの不安を感じながら日々生活しており、まだ事故の収束には程遠い状況です。この問題は今後数十年に渡って、放射能汚染による住民の健康や農作物、住環境への被害、そして人々の不安…と、県民の生活に深い影を落とし続けることが考えられます。

このような状況から、自治体をはじめ企業や団体など多くの組織では放射線測定器を導入しています。ところが、放射線に関する正しい知識と各種測定器の適正な選定や使用方法ならびに計測方法を習得した人材が必要なのですが絶対数が不足しています。放射線に関する実務的な人材の育成は、これから福島県の復興と地域住民の安心・安全にとってなくてはならないものであり、ひいては福島県だけでなく日本において重要な課題になっていきます。そこで本校ではいち早く「放射線工学科」を立ち上げ、平成 24 年度から実際に学科を運営しています。

本書は放射線の基礎知識から測定の方法まで総合的な知識の習得を目指して作成しています。実際に講習会や授業で使用しながら、今後も改定作業は継続していく予定です。

CONTENTS

重要な用語や考え方 4

Ⅰ　放射性物質と放射線の基礎　5

1. 原子力発電と福島第一原子力発電所事故による環境汚染　5

1．原子力発電 5
2．福島第一原子力発電所の事故 7
3．原発事故による環境汚染 8

2．放射性物質と放射線の特徴　17

1．放射線に「常識」は通用しない 17
2．原子と原子核 18
3．放射性物質 19
4．半減期 21
5．放射線の特徴 22
6．環境中の放射性物質の特性 26

3. 放射線の影響　30

1．放射線の影響 30
2．外部被ばくと内部被ばく 34
3．ベクレルとシーベルト 35
4．放射線の線量 38

II　放射線測定　42

1. 放射線と放射性物質の測定の概要　42

1．放射線測定の特徴　42
2．測定の原理　44

2. 空間線量の測定　47

1．測定の原理　47
2．測定器の特性　49
3．サーベイメータを用いて測定するときの注意　54
4．換算係数と有効桁数　55
5．測定器の点検と校正　56
6．測定の手順と注意　57
7．個人線量計による測定　59
8．モニタリングポスト（連続環境ガンマ線測定器）　60

3. 表面汚染の測定方法　62

1．対象とする放射線　62
2．利用する測定器　62
3．測定の方法　62
4．測定の際の注意　64

4. 放射能の濃度の測定方法　66

1．個体の濃度を測る　66
2．液体の濃度を測る　67
3．空気中の濃度を測る　68
4．サーベイメータを用いて簡単に放射能を測る　69

5. 食品放射能の測定　70

1. 放射性物質測定試料の準備　70
2. 食品用放射能測定装置　71
3. ガンマ線のスペクトル　79
4. 食品中放射性物質の暫定規制値　81
5．食品放射線量の測定実習　83

重要な用語や考え方

【放射性物質】 不安定な原子核を含む物質。不安定な原子核は一定の割合で崩壊して安定な原子核に変化し、その際に**放射線**を出す（11 ページ）。「放射線を出す能力」を**放射能**と呼ぶことがある。

【放射線】 放射性物質から出る目に見えない「何か」。放射線が分子にあたると、分子は電離される。放射線の正体は高いエネルギーを持った電子、光子などの流れ（14 ページ）。

【被曝（ひばく）】 人が放射線を浴びること。体の外から浴びる外部被曝と体の内部から浴びる内部被曝がある（24 ページ）。

【ベクレル】 記号は **Bq**。放射性物質の量を測るための単位。異なった種類の放射性物質でも、ベクレルで表わした量が等しければ、出てくる放射線の量はごく大ざっぱには同程度（25 ページ）。

【シーベルト】 被曝によって人がどれくらいダメージを受けた可能性があるかを表わす単位。記号は **Sv** である。年間や生涯での通算で用いる。実用的には、ミリシーベルト (mSv) という単位を使う（1 mSv = 0.001 Sv,1000 mSv = 1 Sv）。外部被曝にも内部被曝にも用いる。被曝の原因が違っても、ミリシーベルトで表わした数値が同じなら、体へのダメージは（だいたいは）同じだと考えられる。（少なくとも、そうなることを目指して、ミリシーベルトの数値が決められている）。なお、シーベルトやミリシーベルトの単位で表わしている量は**実効線量**と呼ばれる（28 ページ）。

【空間線量率】 いわゆる「放射線の強さ」で、単位はマイクロシーベルト毎時 (Sv/h)（37 ページ）。

放射線に「常識」は通用しない 原子核が変化して放射線を出すときには、化学反応と比べるとけたちが桁違いに大きいエネルギーが出入りする。そのため、放射線が関わる現象に私たちの「常識」は通用しない。たとえば、放射性物質の崩壊のスピードを人工的にコントロールするのは（実際問題として）不可能だ（9 ページ）。

低線量被曝の影響の目安「低線量被曝の健康への影響はわからない」と言われることが多いが、それは「かぎりなくひどい影響があるかもしれない」という意味ではない。どれくらいの被害がありそうかについてはいくつかの目安がある。特に、「（自然被曝以外に）生涯で通算 100 ミリシーベルトを被曝すると癌（がん）で死亡するリスク（確率）が 0.5 パーセント上乗せされる」という ICRP の「公式の考え」は一つの出発点になる（21 ページ）。

Ⅰ　放射性物質と放射線の基礎

1. 原子力発電と福島第一原子力発電所事故による環境汚染

1．原子力発電

■原子力についてもっとも重要なこと

原子力というのは、一言でいえば、普段は「ビクともしない」原子核を次々と分裂させてエネルギーを取り出す技術だ。それを利用した爆弾が原子爆弾で、それを利用した発電所が原子力発電所だ。

■ウランの核分裂の連鎖反応

原子力の基本になるのは、図 1 に示したウラン 235（23592U）の**核分裂**だ。まず、ウラン 235 の原子核に中性子が衝突する。中性子はウランの原子核をすり抜けていってしまうことも多いが、十分に速度が遅いと、かなりの確率でウラン 235 の原子核に吸収される。しかし、中性子を吸収したウラン 235 の原子核はきわめて不安定で、すぐに、二つの原子核に分裂する。分裂したあとの原子核の組み合わせは決まっておらず、いろいろな種類の原子核が出てくる。よく名前を聞く**ヨウ素 131、セシウム 137、ストロンチウム 90 などもウランが分裂して作られる**。

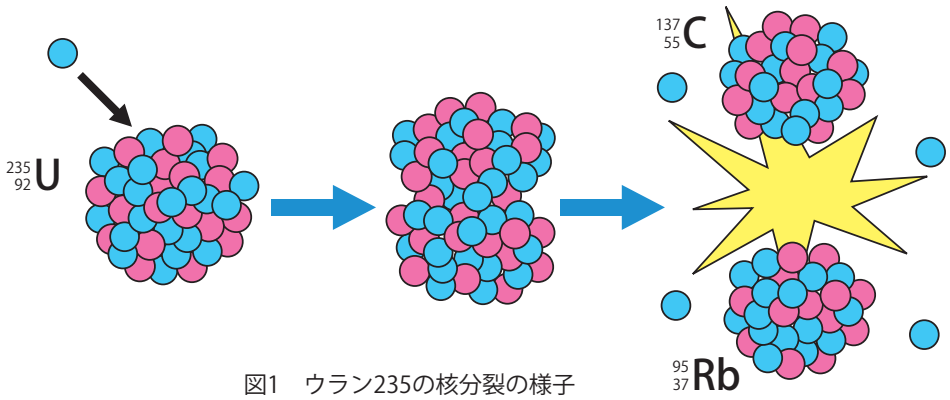


図1　ウラン235の核分裂の様子

▲図 1　ウラン 235 の核分裂の様子

ウラン 235 が中性子を吸収すると不安定になり、すぐに二つの原子核に分裂する（セシウム 137 が作られる反応を示した）。この際にだいたい 2, 3 個の中性子が外に飛び出してくる。この核分裂を次々と連鎖的に引きおこすのが、核分裂の連鎖反応だ。

このようにウランが核分裂するとき、原子核 1 個あたりおおよそ 2 億 eV（電子ボルト）のエネルギーが放出される。たとえば、水素分子 2 個と酸素分子 1 個が反応したときに発生する 5 eV のエネルギーと比較すると、おおよそ 4 千万倍だ。

原子力発電では、ウランの核分裂の連鎖反応を一気におこすのではなく、原子炉の中で「じわじわ」と引きおこす。一回の核分裂で放出された 2, 3 個の中性子の内、平均で 1 個が別のウラン 235 に吸収されて次の核分裂を引きおこすように調整して、核分裂が大きくなり過ぎず、かといって止まってしまわない「ぎりぎり」の状態を作り出すのだ。このような、連鎖反応が「ぎりぎり」で続いていく状態のことを**臨界状態**、あるいは、**臨界**と呼ぶ。

原子力発電では、臨界を維持することで、大爆発をおこすことなく一定のエネルギーを外に取り出すのである。そのため、原子力発電所で使われるウランの燃料（核燃料）には、核分裂をおこさないウラン 238 もかなり混ざっている。

■原子力発電の問題点

原子力発電は、原理的に「やっかいな」二つの問題を抱えている。

一つ目は、放射線だ。ウランの核分裂がおきる際には、中性子線をはじめとした放射線がどんどん飛び出してくる。だから、核分裂の連鎖反応がおきている原子炉の核燃料は、すさまじい放射線源となる。運転中の原子炉は、外に放射線を出さないよう、厳重に分厚い壁で覆わなくてはいけないのだ。

二つ目のやっかいな問題は放射性廃棄物である。ウラン 235 が核分裂すると様々な原子核が作られるが、これらはすべて（中性子が多すぎてバランスの悪い）不安定な原子核なのだ。核分裂の連鎖反応の目的はエネルギーを取り出すことなのだが、連鎖反応のあとには、かならずこれらの不安定な原子核、つまり放射性物質が残ってしまう。このように核分裂の結果として作られる放射性物質のことを一般に核分裂生成物という。

放射性廃棄物は、放射性物質なので、崩壊の法則に従って放射線を出し続ける。放射線は大きなエネルギーを持っているが、そのエネルギーは最終的には熱エネルギーに変わる。つまり、放射性廃棄物は熱を出すということだ。これを崩壊熱と呼ぶ。この放射性物質の崩壊を人工的にコントロールすることはほぼ不可能だ。半減期の短い放射性物質はある程度の時間が経てば消えていくが、半減期の長いものは何年間も何十年間も放射線と熱を出し続ける。

■原子力発電所

戦後の技術導入の経緯から、東京電力は沸騰水型原子炉 (BWR) ※ 1 を、関西電力は加圧水型原子炉 (PWR) ※ 2 を、それぞれ原子力発電所の基本設計として採用し現在に至っている。事故を起こした福島第一原発は沸騰水型原子炉である。これは上から制御棒が入る BWR 型と逆に制御棒が真下から入る構造になっており、200 個位の穴が開いているため、圧力容器の下部はもろく、メルトスルーを起こせば圧力容器も溶けているはずだ。BWR の構造は 30cm 厚の鋼鉄製の圧力容器がある。その周りには直径 6m のドーナツ型のサグレッション・チェンバー（圧力抑制室）といわれるプールがあるのだが、中の水がなくなり放射性物質を含んだガスが充満し圧力が高まった。さらに原子炉を冷却できなくなったために熱い蒸気が格納容器の中にたまり圧力がどんどん上がっていった。爆発する前にベント弁を開けなければならないが、コンプレッサーの空気の圧力で開く構造のベント弁は停電で開かなかった。小さなコンプレッサーをつないでようやくベント弁を開けたが、2 号機はその前に圧力抑制室が爆発している。

※ 1 **沸騰水型原子炉（ふっとうすいがたげんしろ、英 : Boiling Water Reactor、BWR）**は、核燃料を用いた原子炉のうち、純度の高い水が減速材と一次冷却材を兼ねる軽水炉の一種である。

核分裂反応によって生じた熱エネルギーで軽水を沸騰させ、高温・高圧の蒸気として取り出す原子炉であり、発電炉として広く用いられている。炉心で取り出された汽水混合流の蒸気は汽水分離器、蒸気乾燥機を経てタービン発電機に送られ電力を

生ずる。原子炉としては単純な構造ということもあり、日本国内で運転可能な原子炉の中では、最も多いタイプであるが、原子炉炉心に接触した水の蒸気を直接タービンに導くため、放射性物質に汚染されることにより、耐用年数終了時に放射性廃棄物が、加圧水型原子炉 (PWR) より多く発生し廃炉コストが嵩む可能性が高い。また、その汚染のため作業員の被曝量が加圧水型原子炉よりも多い。

発電に利用された蒸気は放射能を帯びている為、蒸気を回収し再循環させるだけでなく、タービン建屋（たてや）など、これに関わる全ての系を堅牢に遮蔽することで、放射線が外部に漏れることを防いでいる。 外部からの核分裂反応の制御は主に制御棒や、冷却材流量の増減で行われ、冷却材喪失事故時には非常用炉心冷却装置 (ECCS) を動作させる。

日本における商用炉では、東北電力、東京電力、中部電力、北陸電力、中国電力各社の全原子力発電所、および日本原子力発電の東海第二発電所と敦賀発電所の 1 号機（2 号機は加圧水型）で、沸騰水型を採用している。

戦後の技術導入の経緯から、東京電力は沸騰水型原子炉 (BWR) を、関西電力は加圧水型原子炉 (PWR) を、それぞれ原子力発電所の基本設計として採用し現在に至る。

※ 2 **加圧水型原子炉（かあつすいがたげんしろ、英 : Pressurized Water Reactor, PWR)** は、原子炉の一種。核分裂反応によって生じた熱エネルギーで、一次冷却材である加圧水（圧力の高い軽水）を 300℃以上に熱し、一次冷却材を蒸気発生器に通し、そこにおいて発生した二次冷却材の軽水の高温高圧蒸気によりタービン発電機を回す方式。発電炉として、原子力発電所の大型プラントのほか、原子力潜水艦、原子力空母などの小型プラントにも用いられる。

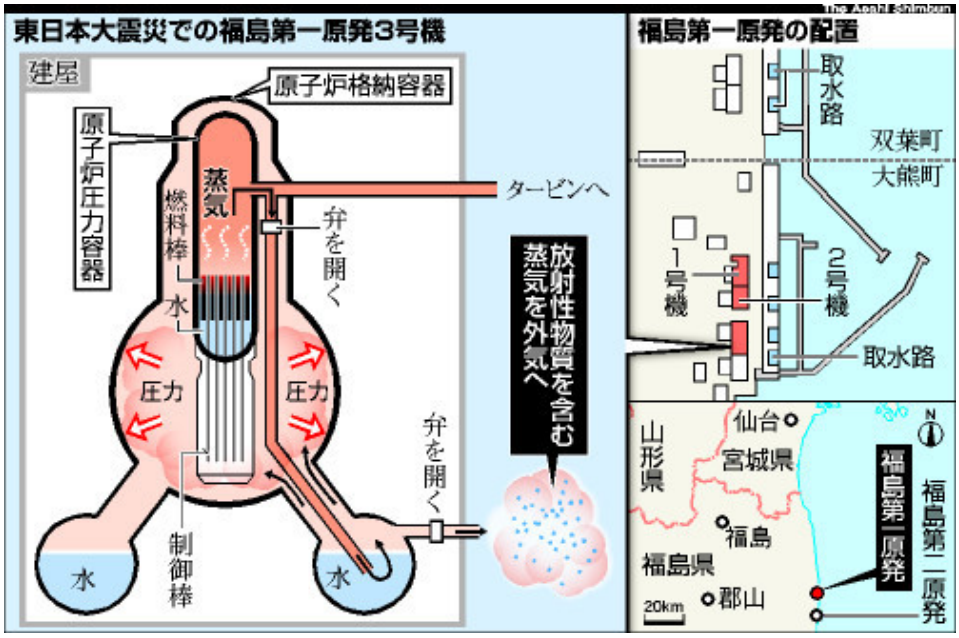
2. 福島第一原子力発電所の事故

2011 年 3 月 11 日の大地震とそれに続く津波のために福島第一原子力発電所で歴史的な大事故がおきた。

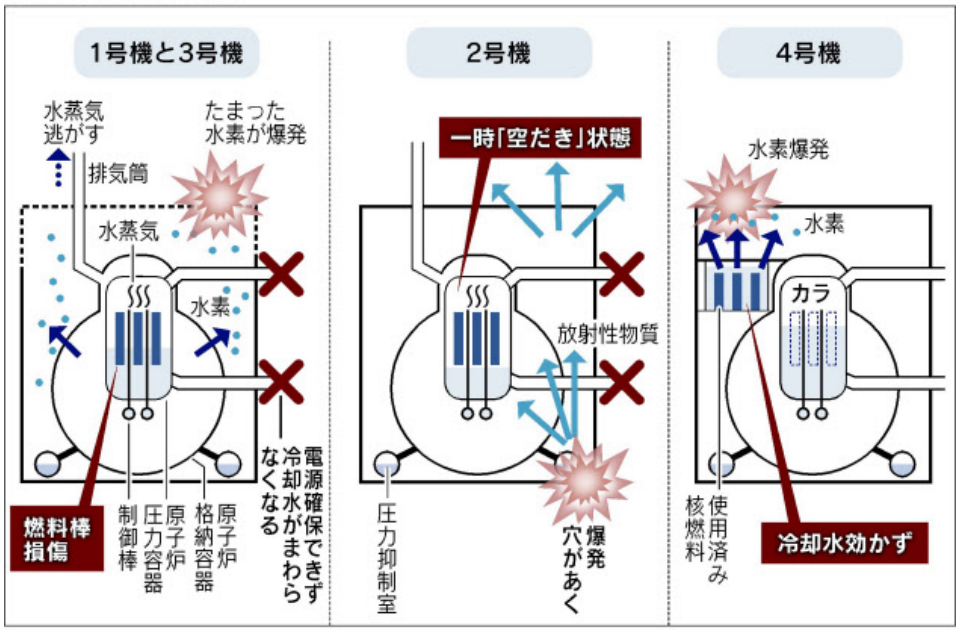
■事故の概要

大地震の直後、福島第一原子力発電所の原子炉にはすべて制御棒が差し込まれ、ウランの核分裂の連鎖反応は停止した。ところが、今回の事故では冷却のための電源と水が失われたため、燃料棒を冷却できない時期があった。この際に燃料棒の温度が異常に上昇し、燃料棒が熔け落ちてしまった。有名になった「メルトダウン（炉心溶融）」だ。熔け落ちた核燃料がどんな風になって、原子炉のどのあたりに落ちているのかは今のところ誰にもわかっていない。

核燃料からの（正確には、核燃料に残った放射性物質からの）異常な発熱のため、核燃料を閉じ込めていた原子炉圧力容器にも穴があいたと考えられている。さらに、原子炉の中で発生した水素が建屋に充満して水素爆発をおこし、建屋や原子炉の一部が破壊された。これら一連の出来事の結果として、大量の放射性物質が原子炉の外に出て周辺にばらまかれてしまった。これに伴って原子炉周辺での放射線は異常に強くなった。福島第一原子力発電所から放出されたヨウ素 131、セシウム 134、セシウム 137 などの放射性物質が風に乗って遠くまで運ばれ、雨とともに地面にふ降りそそ注いだ。その結果、原子力発電所から 30 キロメート以上も離れた土地まで、放射性物質でひどく汚染されてしまった。



福島第1原発の現状

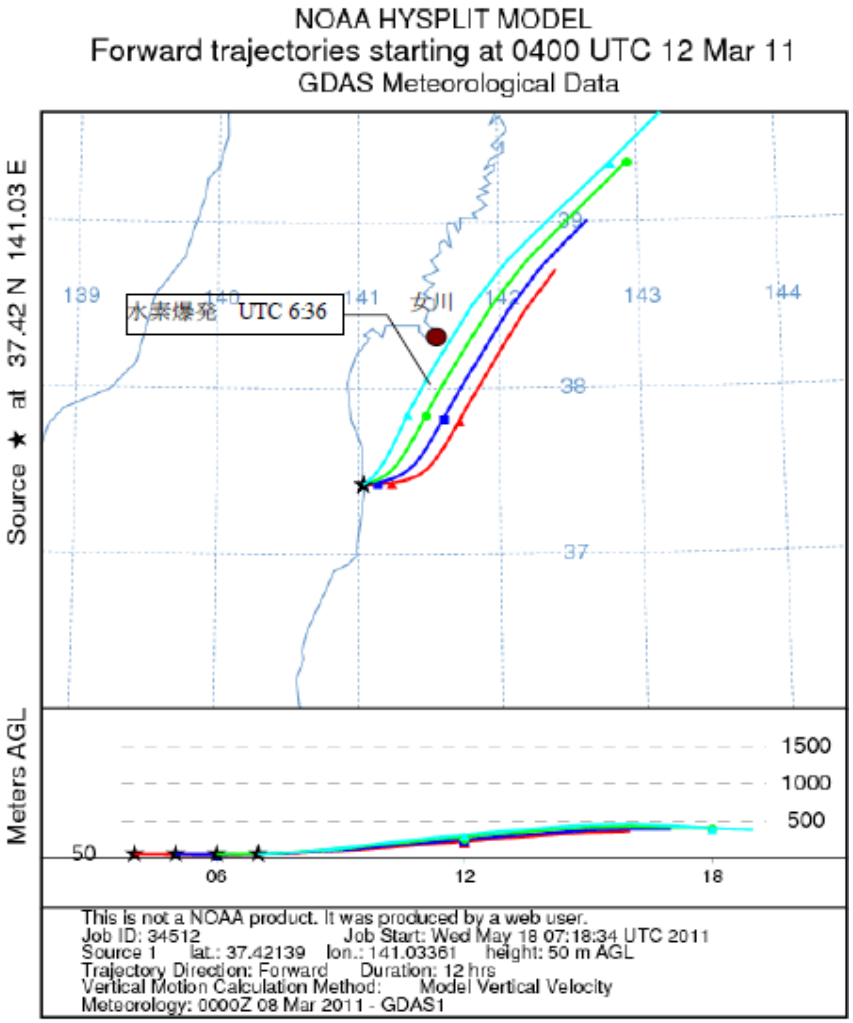


3. 原発事故による環境汚染

大気ベントまたは爆発による放射能を含むガスは煙突から外に出る。1号機の爆発は建屋の周りに拡散してそのあとどうなるかは風まかせだ。その時にどちらの方向に風が流れていたかはアメリカの大気海洋研究所というところでハイスプリットモデルというシミュレーションモデルがあって、それを使うと解析できる。（図）3月12日の1号機の大気ベント爆発のときは北東方向に風が流れていて、1時間ごとの値。下の図は高さを表している。ここは水平面を流れていて海の方に流れている。海の方に流れたので陸地の方の汚染は大きくなかった。このとき起きた事象というのは、女川発電所の放射線モニタ6台あって高さ500mぐらいの所を放射能を含んだ、雲

のような放射性プルームというものが流れていった。一斉に高くなって 2 時間後に元に戻った。つまり上空を流れていったことが証明された。

事象　1号機 大気ベント 10:17 13:42 （世界標準時 UCT 1:17 4:42）
水素爆発　15:36 （UTC 6:36）



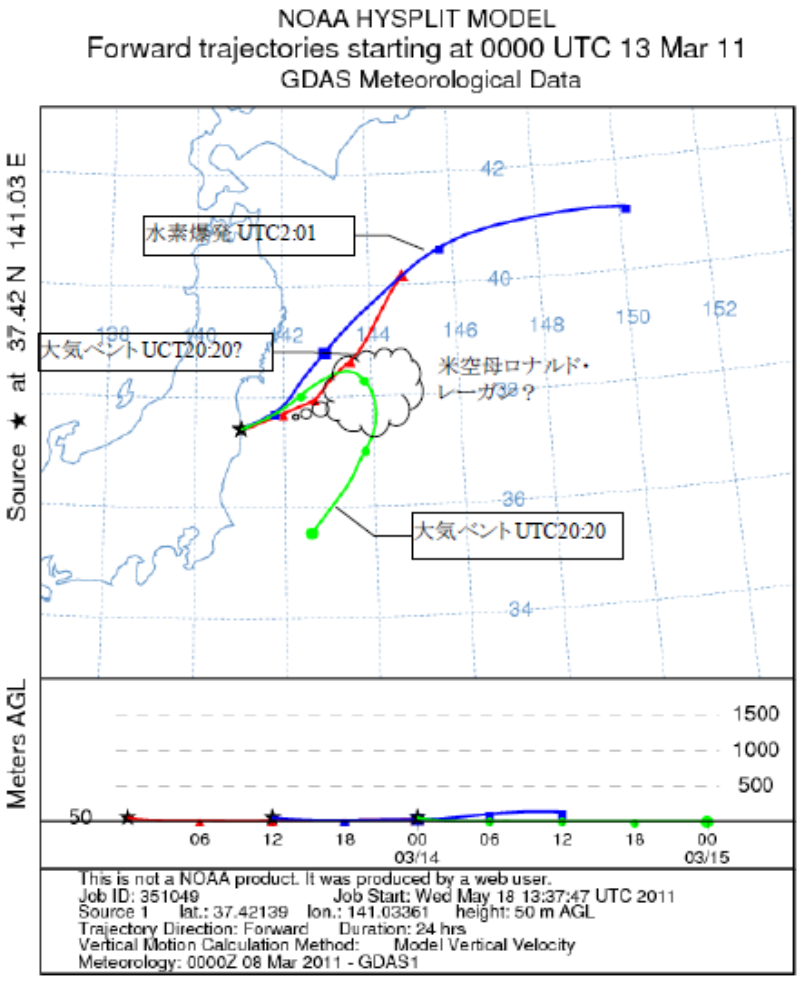
▲ 3 月 12 日の 1 号機大気ベントと爆発

3 号機の時は、爆発したときにちょうど東に風が流れていて、水平面をはうように流れるように流れていった。この時、アメリカ軍のトモダチ作戦で来ていたロナルド・レーガンという空母が原発事故があって避難していた福島沖約 60km 航行しており被ばくしている。それで日本政府に対して 9 億円の慰謝料を請求してきた。その時の爆発の様子を見てみると、これは 1 号機爆発。3 号機は真上に流れている。方向としては西の方から風が吹いていて北の方に流れているのがわかる。3 号機の方は海の方に流れている。発電所ごとの汚染濃度はどうかというと 1 号機と比べると 3 号機の方がはるかに高い。爆発自体も全く違う。3 号機の周りはコンクリートの壁だったので力が上に向いたからこうなったというふうにみられている。

2 号機、3 月 15 日。図は朝 0 時から 12 時までの風の流れの方向を表している。モニタリングステーションの解析結果は福島県のホームページに出ている。何時何分にこの位置を放射線プルームが通過したのがわかる。1 日の間に北風から南風にぐるっと風向きが変わっている。なぜかというと北の方に大きな低気圧があって風が流

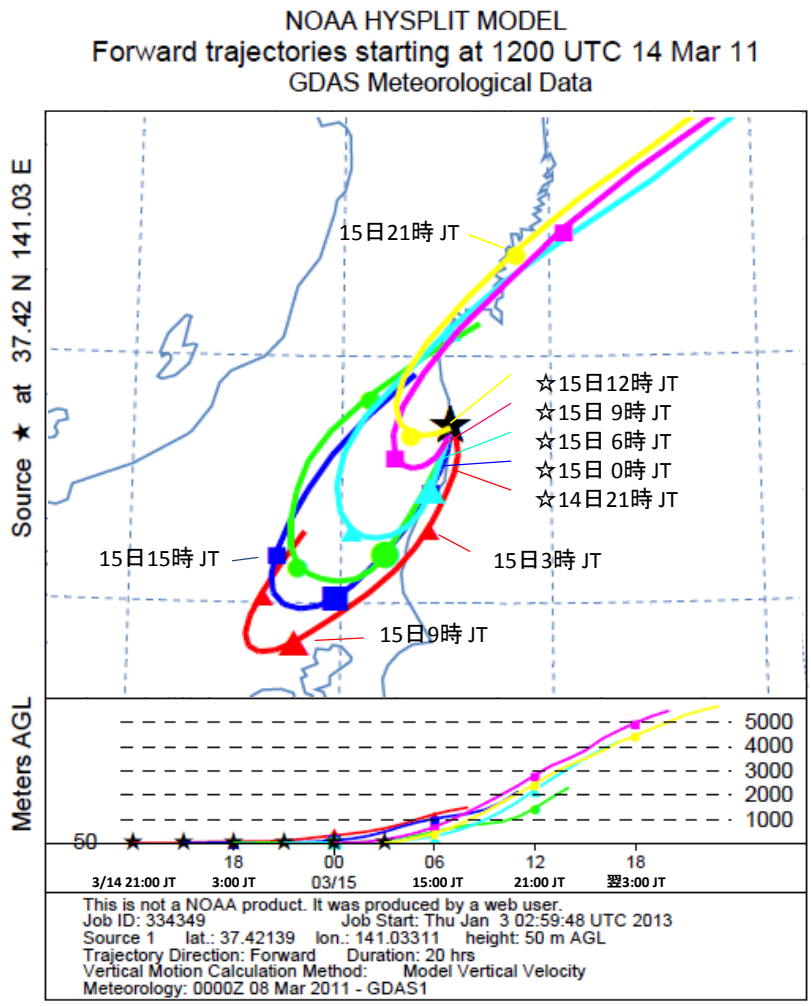
れていったのだ。1 号機と 3 号機のように海の方に風が流れていれば何も問題がなかったが、2 号機の場合はこういう状態になってしまった。たまたま 0 時位に大気ベントを行ったという説明がされており、その時の風の流れは南に向かっており、実は 3 月 15 日の午前中に東京都内に達している。その時東京都内の放射線モニタは一斉に鳴り出した。どうやって止めるんだと電話が殺到した。このとき漂っていた放射性ヨウ素はハロゲン物質で非常に反応性が高い。今の汚染はセシウムが土にくっついているが、土を落とせば汚染はなくなる。この時は、目に見えない、付いているかどうか全くわからないのにものすごい汚染をしている状態であった。茨城県のほうれん草のハウス栽培ではハウスの中の方にまで汚れが入ってきた。それから、例えば家の中に結露して水がたまってくると、ガスが入ってきてこの水の輪っかの通りに汚染した。つまりガスで汚染する。ここは雨は降らなかったので水滴、水道が全部汚染した。東京や茨城とかでホットスポットの話が結構あるが、だいたい木の下、針葉樹や常緑樹のちょうど真下が線量が高く、ちょっと離れると全然線量がないといったものだ。この日の朝は朝露で木が濡れていて、このガスが吸着して木に付いた水滴が雨で流されたのである。東京の杉並とか公園の中のホットスポットはみんなその形態だ。

事象　3号機 大気ベント 9:20(UCT 3/13 0:20) 3/14 5:20？(UTC 3/13 20:20)
水素爆発 3/14 11:01(UCT 2:01)

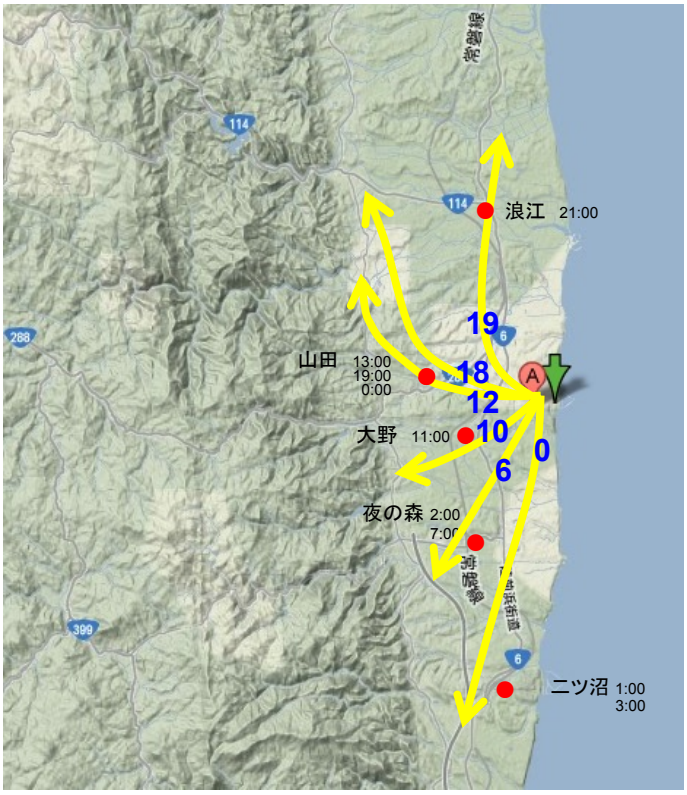


影響　米空母乗員 放射性物質に汚染 北東海域福島原発から160キロの地点にいた空母ロナルド・レーガンが風下から退避した。

▲ 3 月 14 日の 3 号機大気ベントと爆発



▲3月 15 日の 2 号機からの環境への拡散



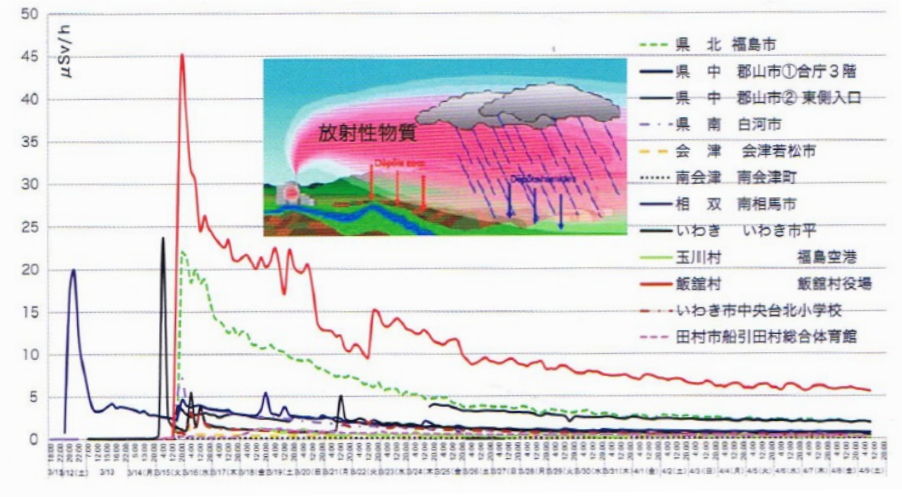
▲モニタリングポストピーク時間からの推定

福島では風向きが大きく変わったのでここから出たものは中通りに戻ってきた。ちょうど、群馬県と福島県の境はこの時に雨が降っていた。高崎の上の 2000m ～ 3000m位まで上がっているが、それがそのまま通過したら何の問題もないがちょうど雨が降っていた。同じ日の午後は北西の風に変わって、その時 2 号機の格納容器の圧力がゼロになり、つまり放射性物質が拡散してしまった。それがなかったのが北西方向。双葉郡のところには山があり、県道を通って、大森地区、国道 114 号線の谷間をずっと通って、ちょっと高くなっている大垣ダム、ここに津島という町があって浪江町の端、浪江の人たちは 114 号線を通って津島地区に避難をした。放射能は上をちょうど通っていった。値はこの地区の山の頂上を表しており、ちょうど山の間を通っていることがよくわかる。川俣町では、この山を越えられないのでそのまま飯舘村のところ流れていっている。ちょうど地形と汚染が一致しているという状況である。いわきは海岸沿いでガスが通過しただけである。雨が降っていないので線量が低い。それに対して福島市はどうかというと、郡山市といっしょで、雨が降ったので汚染して、すぐ下がらない。この下がり具合はヨウ素の半減期である。雨で濡れたのとガスが通過したのとでは全然違うのがわかる。東京はガスが通過しただけなのであの程度の汚染で済んだ。東京に雨が降っていたら、郡山福島と同じくらい汚染していたはずである。実は東京では 1000 万人の人たちがこのガスを吸っていたことになる。今回ガスの濃度はチェルノブイリと比べると非常に低かったので預託線量当量、つまり内部被曝の線量に直しても、1mSV ぐらいなので心配することはないが。福島県民だけではなく、

▲川俣町、飯舘村等の汚染経緯の解析結果

この時は風下に逃げなければ良かった。放射性プルームは 6 号線を南下したところに上から覆い被さったし、114 号線の西に逃げた人たちにも上から覆い被さってきた。その時は外へ出ないで家を完全に目張りをして、濡れたタオルで顔を覆い、密閉された家の中にいてじっとしてることが必要であった。この点では国の指示は失敗であった。日本が成功したのは内部被曝を防いだことである。汚染した物を食べるような状況は防いだことはチェルノブイリと大きく違うところである。ヨウ素もセシウムもちょうどガスの状態だと水に溶けやすい。飯舘村の国道 114 号線では谷間を放射性プルームが流れていった。ちょうどその時期に雪が降っており、この図のような形で雪がくっついていてその通りに汚染している。山を測定すると、林縁、林の縁のところが汚染して、林の木の上、林幹部が汚染した。あとは時間と共に下に落ちてくるので地面の方が汚れてくることになる。

飯舘村の人たちがここは時々浜風が吹くとか、ここが海風が吹き込む地域だということを彼らは知識をもっている。それが本来大事だったのだが 30 億かけて作った文部科学省の SPEEDI という予測システムが全く生かされなかった。そんな大層なシステムを動かさなくても、風向きが変わったというのはわかった。あまりにもシステムとかコンピュータに頼りすぎて、本来避難すべき指示を出せなかったというのは大きな問題であった。

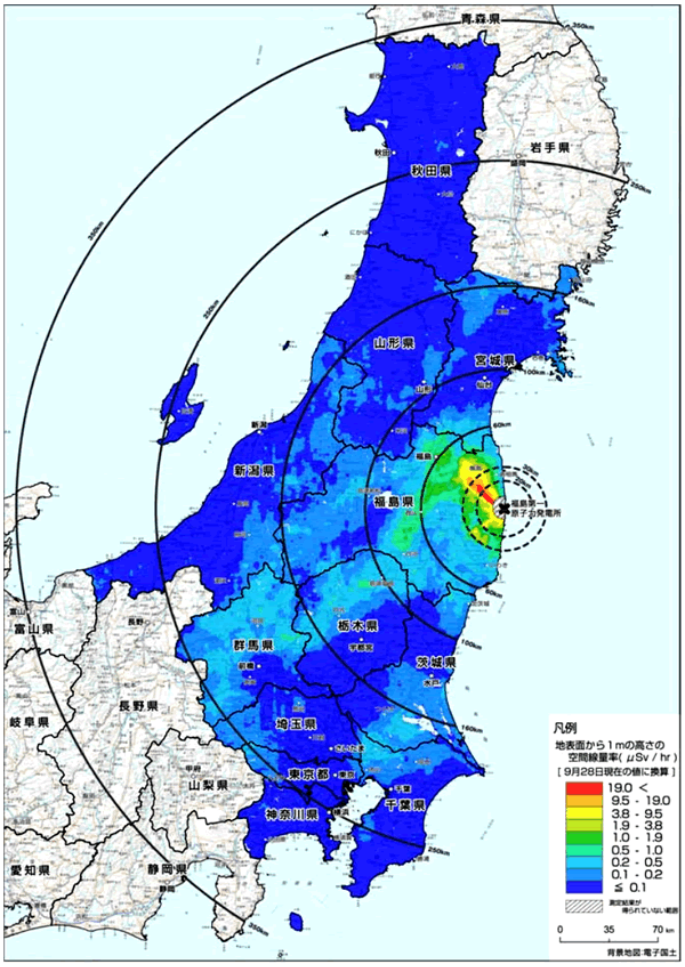


▲福島県各地の空間線量率の推移

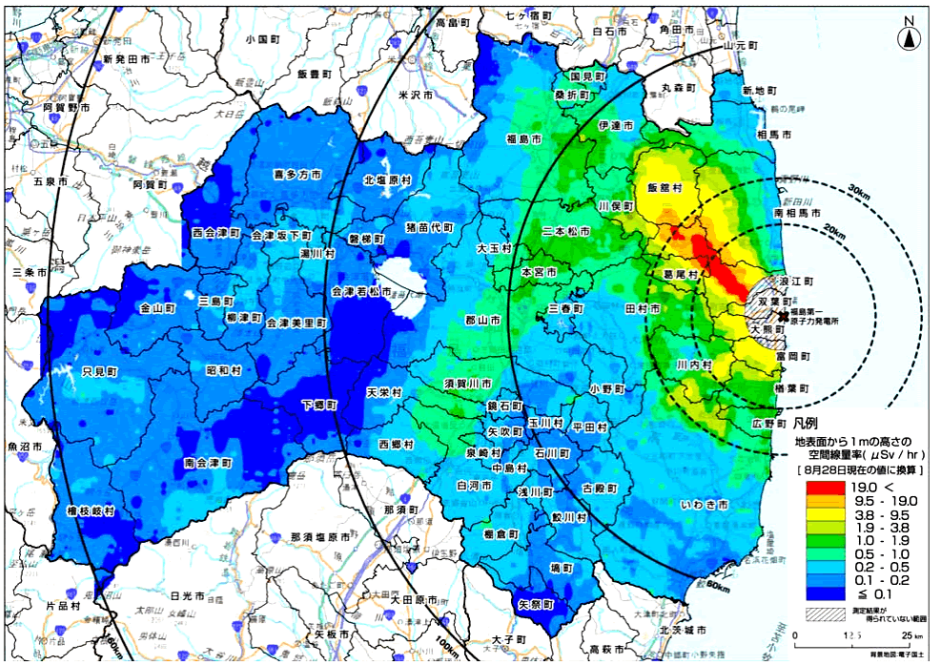
●３月 15 日　福島県いわき市、茨城県、千葉県、東京都、埼玉県、栃木県は主に、キセノン、ヨウ素ガス等が通過し汚染しました。

●福島県中通りは、３月 15 日の夕方の雨により主に地表面が汚染しました。３月 20 日から 24 日にかけては、東北、関東平野で降った雨により放射性物質が降下し地表面が汚染しました。

●第一原発北西方面は３月 15 日の朝から夕方にかけて放射性ガス粉塵により汚染が流れ込んだものと考えられます。この時の、降雪、霧が汚染状況に大きく影響を及ぼしています。



▲文部科学省による新潟県及び秋田県の航空機モニタリングの測定結果について（文部科学省がこれまでに測定してきた範囲及び新潟県及び秋田県内における地表面から１mの高さの空間線量率）



▲文部科学省による福島県西部の航空機モニタリングの測定結果について
（福島県内の地表面から 1m の高さの空間線量率）

■冷却作業はずっと続く

原子炉に残った放射性物質からの発熱（崩壊熱）は、最初の頃よりはずっと弱くはなったが、今も続いている。発熱は、放射性物質が半減期の法則に従って崩壊し、ほとんどなくなってしまうまで、何十年間もつづく。発熱量は放射性物質の量が減るのと同じように着実に減っていくけれど、発熱を止める方法はないし、崩壊を速める方法もない。ひたすら冷やしながら放射性物質が減っていくのを待つしかないのだ。原子炉とは別に、原子炉の近くのプールの中に「使用済み核燃料」が保管してある。使用済み核燃料というのは、ウランを使い切ったあとの燃料棒のことで、大量の放射性物質を含んでいる。これも崩壊熱を出し続けるので、せっせと冷やし続けないといけない。冷やそうが冷やすまいが、崩壊は同じように続き、発熱は（着々と減ってはいくが）何年も続く。それでも一生懸命に冷やしているのは、冷やさずに放っておくと原子炉や使用済み核燃料の温度が異常にあがって新たな事故を引き起こしてしまうからだ。現場での崩壊熱とのたたか闘いはずっと続いてきたし、これからもまだまだ続くのだ。

また、原子炉を冷やすのに使った水は放射性物質に汚染されるので、外に捨てずきちんと保管しておかなくてはならない。しかし、当然ながら、汚染された水の量はどんどん増えていった。いつの間にか、ためておいたはずの水がも漏れて、海水（そして、おそらくは地下水）を汚染するという事故も発生した。

■再臨界について

今、原子炉の中ではウランの核分裂の連鎖反応は止まっている。たまたま条件が整って再び連鎖反応が始まることを「再臨界」と言う。

運転中の原子炉でおきているような連鎖反応が本当に始まってしまったら実に危険だ。これまでとは桁違いの発熱が生じて容器がさらに壊れてしまう可能性があるし、放射性ヨウ素を始めとした放射性物質がまた新たに作られてしまうからだ。ただ、そういう「本格的な再臨界」がおきる可能性は考えなくてよいというのが専門家の一致した意見のようだ。

■「冷温停止状態」になって事故は「収束」したのか

2011 年 12 月 16 日、政府（より正確には、原子力災害対策本部）は、事故をおこした福島第一原子力発電所の原子炉が「冷温停止状態」になったとして、「原子炉は安定状態を達成し、発電所の事故そのものは収束に至った」と宣言した。どう考えても、原子力発電所事故はまったく収束などしていない。「冷温停止」というのは、普通は、運転を停止した原子炉の燃料棒の温度が 100 度以下まで下がった状態を言う。当然、原子炉はあるべき姿をしていて、通常の冷却システムが動いていて、温度計などの測定計器もちゃんと動作していることを前提にした言葉だ。そういう状況であれば、確かに「冷温停止」は原子炉が「安全に止まった」という一つの目安になる。事故から 1 年以上が経ち、現場で働く人たちの決死の努力のおかげで原子炉は安定してきたようにみえる。原子炉の温度もかなり下がって安定してきたし、原子炉をカバーで覆って安全にする作業も進められている。

しかし、事故をおこした 1, 2, 3 号炉では、燃料棒は熔け落ち、圧力容器は破損し、中の様子がどうなっているのか誰にもわからない。初期に比べればずっと少ないとはいえ、今でも壊れた原子炉からは放射性物質が外にも漏れ続けている。冷却システムは急ごしらえの不完全なもので、燃料棒の正確な温度などわかるわけもない。さ

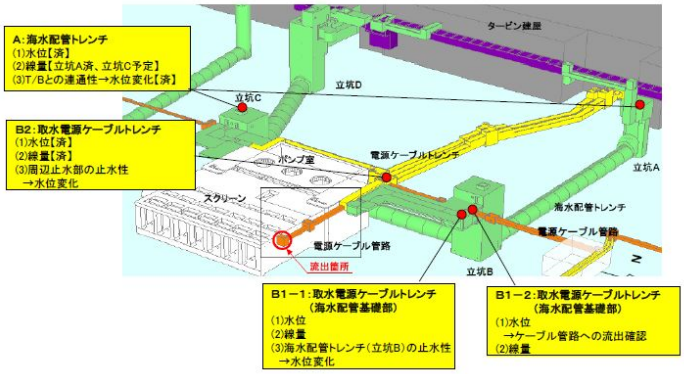
らに言えば、原子炉の近くは、放射線がきわめて強く、人が長いあいだ作業できる環境ではない。そのため、福島第一原子力発電所での最近の工事は、すべて限られた時間の中で応急処置的に進められている。そのような状態の原子炉は、本来の意味での「冷温停止」とはまったく別の状況だ。中の様子もわからず、冷却システムも不完全で、核燃料を安全に処理する見通しもないまま、勝手に「冷温停止状態」を宣言したとしても、安全が確保されることにはならない。

原子炉の調子が急に悪くなって暴走して爆発をおこすといった可能性は今ではかなり小さくなったと思われる。しかし、再び大きな地震や津波に襲われるという事態もあり得ることを考えると、まったく安心はできない。仮ごしらえの冷却システムやカバーが大災害に耐えられる保証はないし、爆発でダメージを受けた建屋が崩れるおそれもある。そうすると、またしても放射性物質が周囲にまき散らされてしまう事態が起こる可能性があることを忘れてはならない。

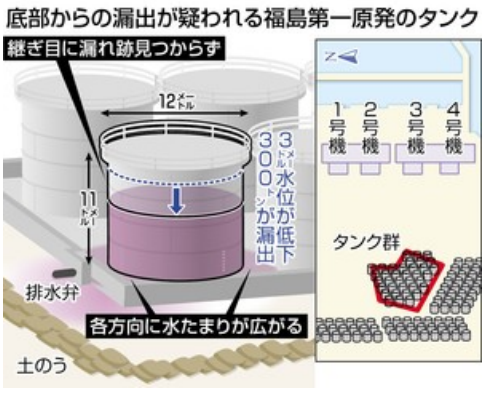
■今も続く汚染水問題

海に大量の放射性物質が流れ出ているという原発の汚染水が問題となっており、打開策がないまま時間が過ぎている。主に 2 号機から汚染水が海に流れ出ている。地下にトレンチというトンネルがたくさんあり、ここを配管や清掃管が通っている。この中を汚染した水が通って海に流れている。当初から流れたほとんどの汚染水は海に流れている。それで今問題になっているのが地下水で、山側からの地下水が発電所の下を通り、汚染した水がそのまま浸透して海に流れている。海側に遮水壁を作ろうという計画を立てたが、汚染水は 1 日 1000 トンも流れており、遮水壁では完全に止めることは不可能でありこの計画は頓挫した。国が検討している汚染水対策が凍土遮水壁である。これは水が流れないところまで凍らせてしまえば、地下水は壁で止まって周りを回って海に行くから汚染されないだろうという考えだ。トンネルを掘ったりするときに地下水がどんどん流れてくるのを防ぐためにこういう凍土壁は仮設で作る。

汚染水は図のようにボルトで締め付ける程度の造りの簡易型のタンクを大量に並べて保管されている。しかしその汚染水が溢れて 300 リッター、300 トンまでいったところもある。それが浸透して近くの井戸の地下水が 55 万ベクレルのベータ線を出す放射性物質で汚染されている。タンクがあってもすでにここにある地下水が汚染していて役に立たない。



▲ 2 号機トレンチの主な調査内容



▲タンクの底から汚染水 300 トン

2. 放射性物質と放射線の特徴

1. 放射線に「常識」は通用しない

はじめに、これまでの**私たちの「常識」は放射線には通用しない**という重要な注意をしておく。

一般に、**原子核が変化するときには、百万 eV あるいはそれ以上のエネルギーが出入りする**ということだ。**化学反応に伴うエネルギーの出入りに比べると、桁違いに大きなエネルギーが関わっている**のである。

■「常識」が通用しないということ

「**放射線は見えない**」のは放射線は原子よりもはるかに小さく電子顕微鏡でも見えないものであり、人間の目や耳や鼻などの器官に直接影響を与えることができないからである。(専用の測定器を使えば計測は可能である)。

もうひとつの大切な特徴は、私たち自身は化学反応で生きており、化学反応を利用して暮らしている。私たちが持っている物質の常識はこれらの化学反応から学んだものがほとんどである。しかし、このような常識が原子核が変化する現象にはまったく通用しないということだ。

通用しないというその理由は、化学反応に伴うエネルギーと比べて、**原子核の変化に伴うエネルギーが何百万倍、何千万倍と桁違いに大きい**からだ。関与しているエネルギーの大きさは、現象の「生じやすさ」を決めるもっとも大事な鍵になる。化学反応と原子核の変化では、生じ方が根本的に違うのだ。

化学反応での常識が通用しない重要な例は、放射性物質の崩壊だ。

放射性物質の量は半減期の法則に従って徐々に減っていく。これに付け加えるべきなのは、このような**放射性物質の減り方を人工的にコントロールするのはほとんど不可能**ということだ。

例えば、

・放射性物質を冷やしてやれば崩壊が止まるのではないか

・温度や圧力をものすごく高くすれば崩壊が早まって素早く分解できるのではないか

・うまい薬品や微生物を使うことで、放射性物質を無害にできないか

これらのやり方は化学反応についてなら考えられるが、何百万倍のエネルギーが関与する原子核の変化には、まったく当てはまらない。

だから、煮沸消毒しても、焼却炉で燃やしても、微生物に食べさせても、放射性物質を分解して無害な物質に変えることもできない。一度環境に放出された放射性物質の総量を効率的に減少させる手段はなく、放射性物質が自分で勝手に崩壊してくれるのを待つしかないのだ。

放射性物質で汚染されたものを回収して容器に入れて長期間保管する必要があるのはこの理由による。また、最終処分といっても処分(消滅)されたわけではないことにも注意する必要がある。

2．原子と原子核

■原子と原子核

世の中には、およそ 110 種類ほどの元素がある。

水素（原子番号 1）からウラン（原子番号 92）までの 92 種類は、ほとんどが自然界で発見されたが、ネプツニウム（原子番号 93）以降は人工的に作り出された元素である。

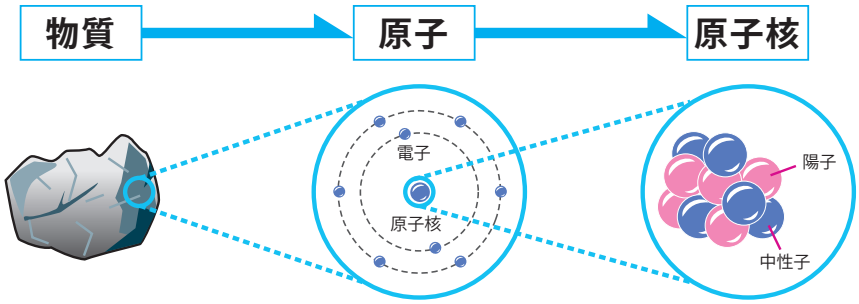
・**原子**の構造は、中心にある原子核とその周囲に存在する電子からなっている。

・**原子核**は、正の電荷をもつ陽子と電荷をもたない中性子から成り立っている。

・**原子番号**は陽子の数を表し、陽子の数と中性子の数を合わせたものが質量数となる。

・陽子の質量は、電子の質量のおよそ１８４０倍。

・元素は、原子の種類。原子核の陽子の数（原子番号）で決まる。



▲図 2　物質・原子・原子核

■同位体・同位元素（アイソトープ）

同じ原子番号の元素でも質量数が異なる（中性子の数が異なる）ものを**同位体**または**同位元素（アイソトープ）**という。

例えば、水素は、大半が陽子1個だけからできているが、陽子・中性子ともに1個からできた重水素や陽子1個と中性子2個からできた三重水素と呼ばれるものもある。

・**安定同位体：**同位体の中でも放射線を出さないもの（例えば水素、重水素）

・**放射性同位体（ラジオアイソトープ）：**放射線を出すもの（例えば三重水素）Ｈ１

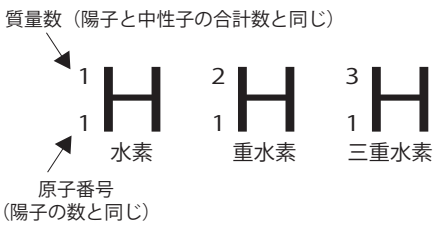
■原子の表記法

元素記号の左上に質量数、

左下に原子番号を示す。

質量数＝陽子（P）の数＋中性子（N）の数

原子番号＝陽子（P）の数

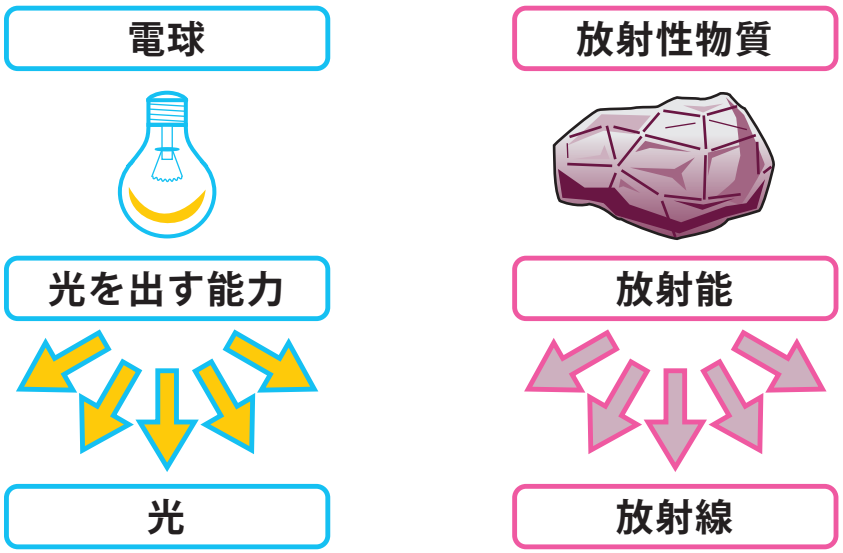


3. 放射性物質

■放射性物質、放射線、放射能

不安定な原子核を含んでいる物質のことを**放射性物質**という。放射性同位元素というのとほとんど同じで、セシウム 134、ヨウ素 131 といった物質を念頭に置いて使うことが多い。不安定な原子核は一定の割合で崩壊し、その際に、放射線を出す。だから、**放射性物質からは放射線が出てくる。**

放射能とは本来の意味は「放射線を出す能力」ということだ。だから、「放射性物質」＝「放射能を持った物質」ということになる。実際には、放射能という言葉はかなり広い意味で使われる。たとえば、「放射能を帯びた瓦礫（がれき）」というときには「放射性物質がまざっている瓦礫」という意味だ。「原子力発電所から放射能がもれている」というような言い方もよく耳にするのだが、これはちょっと困る。「原子力発電所から放射線が外に出ている」という意味と「原子力発電所から放射性物質が外に出ている」という意味の両方が考えられるが、この二つの意味は大ちがいなのだ。「放射能」という言葉を目にしたときは、注意して、どういう意味で使っているか考えなければならない。



▲図 3　放射性物質・放射能。放射線を電球の光に例えると

■放射線の単位

(1) ベクレル

ベクレル（記号は Bq）とは、**放射性物質（あるいは、放射性同位元素）の量を測るための単位**だ。

正確な定義は、

「**1 ベクレル (1 Bq) の放射性物質があれば、平均で 1 秒間に 1 個の不安定な原子核が崩壊する**」ということだ。もう少し「実用的」には、たとえ放射性物質の種類がちがっても、ベクレルで表わした量が等しければ、出てくる放射線の量はごく大ざっぱには同程度になる。

2 種類の放射性物質（放射性同位元素と言ってもいい）のベクレルで表わした量が等しければ、質量や体積がまったく異なったとしても、出てくる放射線の量はごく大

ざっぱには同程度である。

たとえば、カリウム 40 という放射性物質の 4000 ベクレル (4000 Bq) は、質量でいうと、0.015 グラム (0.015 g) に相当する。実は、大人の体の中には、まったくの自然の状態で、これくらいの量のカリウム 40 がある。一方、同じ 4000 Bq のセシウム 137 の質量は、たったの 0.0000000012 g である。質量で比べればこれら二つはまったく違うのだが、それでも、出てくる放射線で比べると、大ざっぱには「同量」ということになる。放射線について考えたいときには、重さ（質量）や体積よりも、ベクレルで表わした量が便利だ。

核種	記号	半減期	崩壊の際に出る放射線
ストロンチウム 89	$^{89}_{38}Sr$	50.5 日	ベータ線、ガンマ線
ストロンチウム 90	$^{90}_{38}Sr$	28.8 年	ベータ線
ヨウ素 131	$^{131}_{53}I$	8.02 日	ベータ線、ガンマ線
キセノン 133	$^{133}_{54}Xe$	5.25 日	ベータ線、ガンマ線
セシウム 134	$^{134}_{55}Cs$	2.06 年	ベータ線、ガンマ線
セシウム 137	$^{137}_{55}Cs$	30.2 年	ベータ線、ガンマ線
プルトニウム 239	$^{239}_{94}Pu$	2.41 万年	アルファ線、ガンマ線
プルトニウム 240	$^{240}_{94}Pu$	6.56 千年	アルファ線、ガンマ線
ラドン 222	$^{222}_{86}Rn$	3.82 日	アルファ線、ガンマ線

▲表 1　いくつかの核種の半減期と崩壊の際に放出する放射線

●食品や水の汚染の場合

ベクレル毎キログラム（Bq/kg）という単位を使う。これは、**食品や水 1 キログラムあたりに何ベクレルの放射性物質が入っているか**を表わしている。たとえば、「食品中の放射性セシウムの濃度が 100Bq/kg」ということは、この食品 1 キログラムの中に 100 ベクレルの放射性セシウムが入っているということだ。これらの単位で表わされる量がどういう意味を持つのか（そもそも、3 万 Bq=m^2 とか 100 Bq/kg というのは、多いのか少ないのか、「やばい」のか気にしなくていいのか）については、あとで取り上げる。

(2) グレイ

グレイ (Gy) は放射線のエネルギーが物質や人体の組織に吸収された量を表す単位。放射線が物質や人体に当たるともっているエネルギーを物質に与える。 1グレイとは、 1キログラムの物質が放射線により1ジュールのエネルギーを受けることを表す。

(3) シーベルト

シーベルト (Sv) は人体が受けた放射線による影響の度合いを表す単位。
放射線を安全に管理するための指標として用いられる。

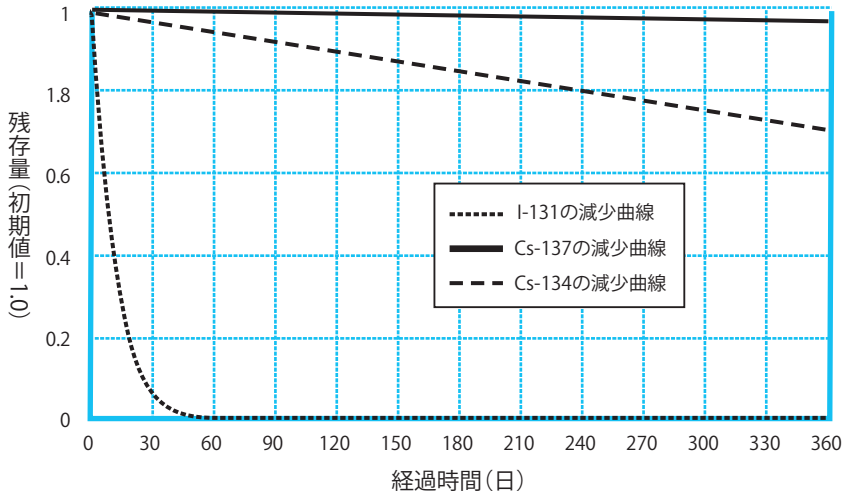
4. 半減期

放射性物質のもう一つの大きな特徴は、時間が経過すると何も処理をしないにもかかわらず放射性物質が自然に減少することである。減少することによって**最初の量の半分になるまでの時間のことを半減期（正確には物理的半減期）**と呼ぶ。この半減期は放射性物質の種類によって決まっており、温度や圧力、化学的な条件などの環境によって変わることはない。

たとえばヨウ素 -131（以下、I-131 と記す）とセシウム -137（以下、Cs-137 と記す）では半減期の違いによって経過した時間と残存する量が大きく異なってくる。なお、半減期分の時間が経過して半分に減ったのちに、同じ時間経過すると残った半分のすべてがなくなるわけではなく、最初の 4 分の 1（＝ 1/2 × 1/2）になるだけである。

原発事故直後では、I-131 によるホウレンソウなど葉物野菜の汚染が話題となった。この I-131 の半減期は約 8 日であることから、8 日過ぎれば半分に減って、さらに8日過ぎると 4 分の 1 になる。文部科学省が平成 23 年 9 月 21 日に公開した土壌中ヨウ素の測定結果では平成 23 年 6 月 14 日時点に換算した単位面積あたりの地表面へのヨウ素 131 の沈着量（Bq/m^2）は最大でも、55,391Bq/m^2 であった。この土壌中の I-131 は 12 月 31 日になれば 6 月 14 日から 200 日経過するので 3,200 万分の 1 に減少することになり、ほとんど消えてなくなると考えてよい。

一方、放射性セシウムの一つである Cs-134 の半減期は約 2 年、また Cs-137 は約 30 年であるから、事故後数カ月程度の時間では、それほど減少しない。図 4 に I-131、Cs-134 および Cs-137 がそれぞれの半減期に従って減少していく様子を示す。比較のため、この図では最初に同じ量の1あったときを示している。数カ月経過すると、I-131 は減少してほとんど 0 になってしまう。このため、時間が経過すると、その量を測定することが難しくなり、I-131 による被ばくがどの程度であったか、その影響がどの程度あるかを求めることが困難になる。一方、Cs-134 で 0.71、Cs-137 は 0.98 残っている。この図から、事故からほぼ1年経過したときに環境中に残っているのは Cs-134 と Cs-137 が中心と考えてよい。本書でも放射性セシウムを中心に紹介する。

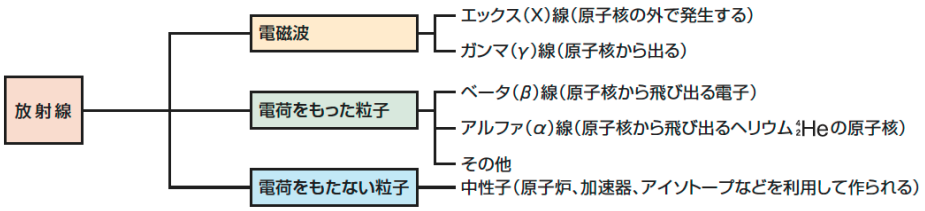


▲図 4　半減期の違いによる放射性物質の減少

5. 放射線の特徴

放射線とは、不安定な原子核が崩壊するときに外に飛び出してくる、大きな運動エネルギーを持った粒子の流れ（あるいは、その粒子そのもの）のことだ。放射線は、光と同じように、まっすぐに進む。放射線を出す元になるもの（放射性物質の塊など）を放射線源あるいは線源と呼ぶことがある。

放射性物質から放出される放射線には大きく分けて電磁波と粒子がある。電磁波の代表はガンマ線であり、粒子の代表はその正体が電子のベータ線である。これ以外にヘリウム原子核と同じ構造のアルファ線や、電荷をもたない中性子線などがある。いずれの放射線も種類やエネルギーによって異なるが、物質を通り抜ける性質をもっている。



▲図 5　放射線

■放射線の性質

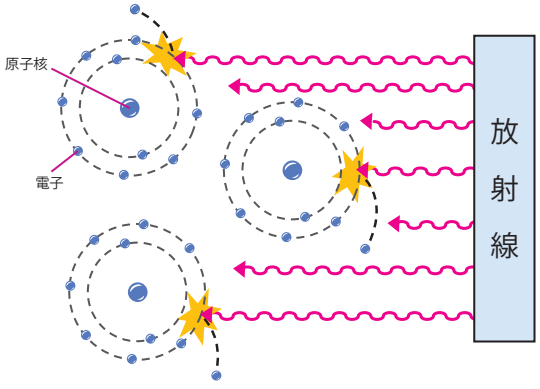
(1) 電離作用と励起作用

放射線が原子を通過する時に電子を弾き飛ばす働きを**電離作用**と呼び(図 6)、残った原子は、プラスの電荷をもった原子（イオン）になる。また、放射線が原子を通過する時により外側の軌道に電子が遷移することを**励起作用**と呼ぶ。(P37,38)

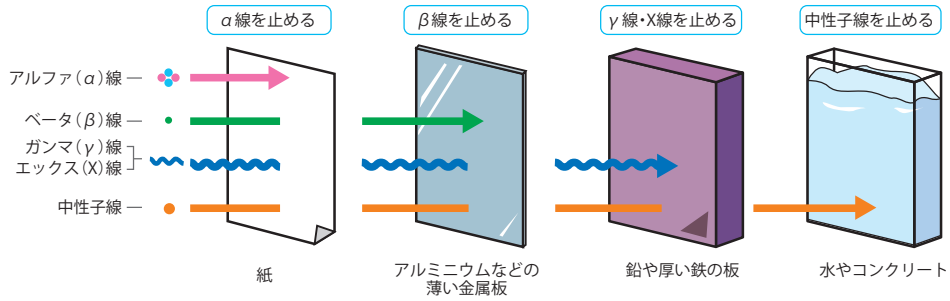
これらの作用を用いて原子の構造を変えることができ、例えば、プラスチックなどの高分子に放射線を当てて、原子の結び付きを変えることで、丈夫な素材を作ることができる。また、放射線を植物に照射して自然界で起こる突然変異の速度を速めることができることを利用して、品種改良などを行っている。

◆電離作用を利用した測定器：GM計数管や半導体検出器、電離箱などは筒の中に入った空気または不活性ガス（ヘリウム、ネオン、アルゴンなど）が放射線によって電離されることを利用している。筒の中にある芯と筒の間にプラスとマイナスの高電圧を掛けて電離した電荷を集め、これが信号となって放射線を数える。

《電離作用》



▲図 6　電離作用

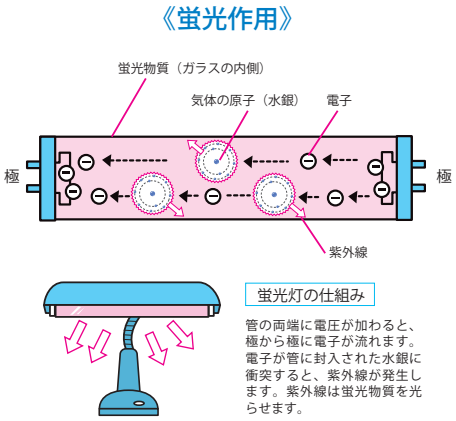


▲図 7　アルファ線、ベータ線、ガンマ線が遮蔽される様子。アルファ線は紙 1 枚で、ベータ線は薄いアルミ板で、ガンマ線は厚い鉛板で止められる。

(2) 蛍光作用

蛍光作用とは、紫外線や放射線などが特別な物質に当たった時、その物質から特殊な光を出させる働きのことをいう。この光を蛍光といい、蛍光を出す物質を蛍光物質という。エックス（X）線の発見は、この蛍光作用によるものである。

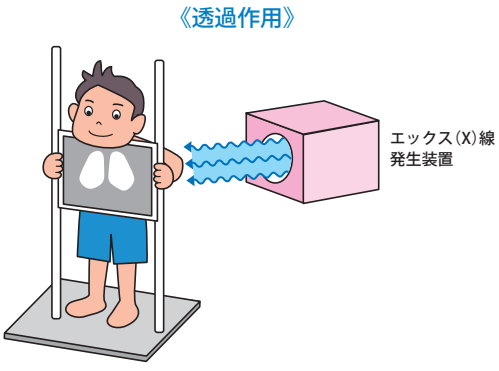
◆蛍光作用を利用した測定器：シンチレーション式サーベイメータ、蛍光ガラス線量計、熱蛍光線量計など



▲図 8　蛍光作用

(3) 透過作用

放射線には、物質を通り抜ける作用がある。病院のエックス（X）線撮影は、この透過作用を利用したもの。また、物質を通った後に放射線の量が減っていることを利用して、水位や鉄板、紙などの厚さを測ることができる。

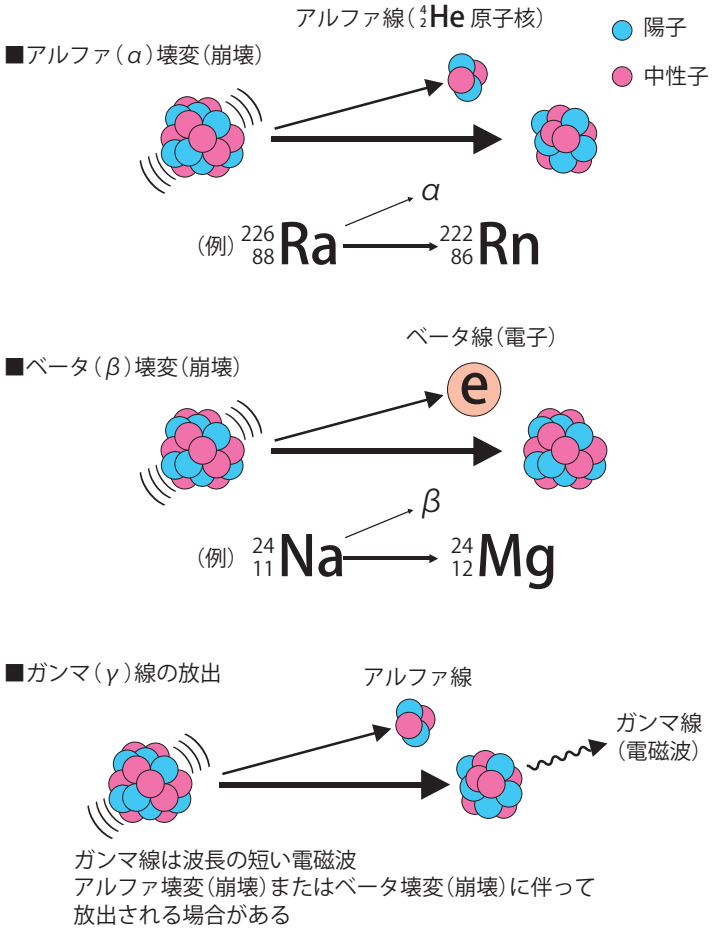


▲図 9　透過作用

■放射線の種類

アルファ線は紙1枚または空気数cmで遮蔽されるのに対し、ガンマ線は木材やガラスでは十分に遮蔽されず、コンクリートや鉛で遮蔽することができ、ベータ線はその中間の性質がある。

▼図10, 11, 12



アルファ線：アルファ線は、大きな運動エネルギーを持ったヘリウム 4 の原子核 (陽子 2 個と中性子 2 個の塊) の流れである。ヘリウム 4 の原子核をアルファ粒子と呼ぶこともある。アルファ線は、物質の中に入ると、すぐに原子と 衝 突 して電離作用をおこす。そうやって、さっさと衝突するため、アルファ線は物質の中を少し進むと急激に弱まっていく。紙一枚あれば止められるとよく言われる (図 7)。空気中でも数センチの距離を進むと弱まってほぼ消えてしまう。

それでは、アルファ線が遮蔽されるとヘリウム原子核はどこに行くのか。当然、なくなりはしない。アルファ線は物質と衝突してエネルギーを失って停止し、たとえば服の表面に付着したり空気中にただよったりして、放射線としての透過する能力はなくなる。

* ガンマ線が入射した場合、原子からすごい勢いで電子を叩き出すので、その電子が物質中を 飛んで、さらに電離をひきおこす。

* 福島第一原子力発電所事故の影響で中性子線を被曝する可能性はまったくないが、中性子線も被曝すると危険な放射線だ。

ベータ線：ベータ線は、大きな運動エネルギーを持った電子の流れ。やはり、物質の中に入ると、さっさと原子と衝突して電離させる。アルファ線ほどではないが、物質中を進んで行くとどんどん弱くなっていく。数ミリのアルミ板で止められる（図 7）。空気中でも数十センチの距離を 進むとほぼ消える（ただし、飛距離はエネルギーによって変わるので、これは簡単な目安）。

ベータ線の電子はアルファ線と同じように徐々にエネルギーを失って、遮蔽体中の原子に取り込まれたり自由電子になって結晶の中に取り込まれたりする。この状態になれば、放射線としての電子と物質中の電子とは区別がつかなくなってしまう。

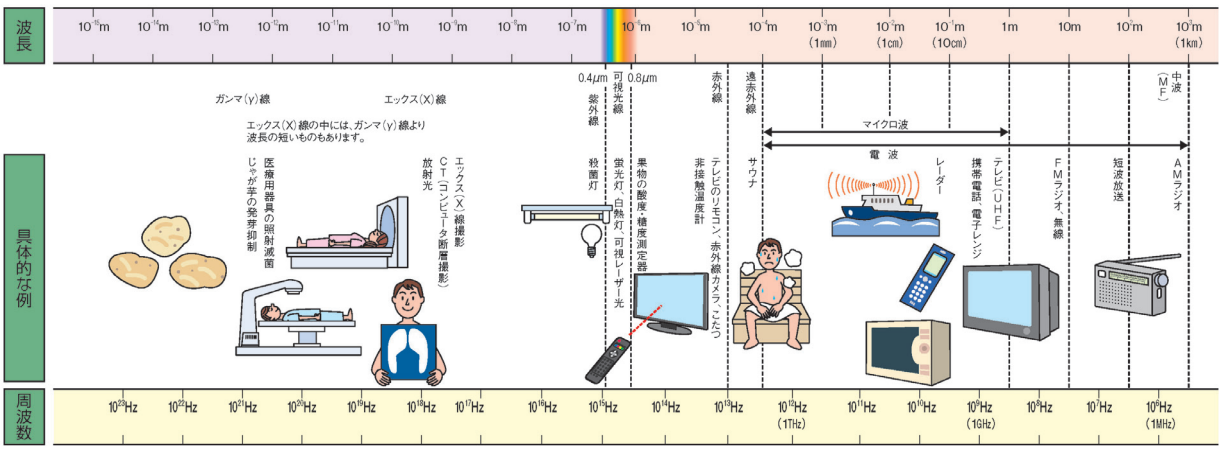
ガンマ線：ガンマ線は、大きな運動エネルギーを持った光子の流れ。ものすごく波長の短い（そして、エネルギーの高い）光の仲間だと言ってもいい。レントゲンでお馴染みの X 線も、ガンマ線とほとんど同じ、エネルギーの高い光だ。アルファ線やベータ線とは違って、ガンマ線は物質の中に入っても、原子とはあまり衝突しないで、どんどんすり抜けていく。そして、ごくまれに原子と衝突する。そのため、ガンマ線を止めるには 10 センチ程度の鉛の板が必要になる（図 7）。また、空気中でも、弱くなってほぼ消えるまでに数百メー トルの距離を飛ぶ。

また、ガンマ線は遮蔽体の物質に少しずつエネルギーを与えて、自分のエネルギーを失って最終的には消えてしまう。つまり、ガンマ線でも遮蔽体の厚みが大きくなると少しずつ減少する。

Cs-137 が放出する主なガンマ線のエネルギーは 662keV で、コンクリート 4cm で半分に減少し、20cm の厚さでは約 30 分の 1 となる。これより、全くコンクリート遮蔽がないときの空間線量率に比較して、厚さ 20cm のコンクリート製の建物の中にいれば空間線量率ほぼ 30 分 1 に減少するので、被ばくする量も減少することになる。

このように放射線の正体は特別なものではなく、普通の身の回りにある粒子（とは言っても、非常に小さなものであるが）などが単に高速で移動しているものであり、その移動速度はエネルギーによって異なる。なお、ガンマ線は光とおなじ速さである。

▼図 13　電磁波の種類



出典：（独）日本原子力研究開発機構「放射線ってなんだろう?」

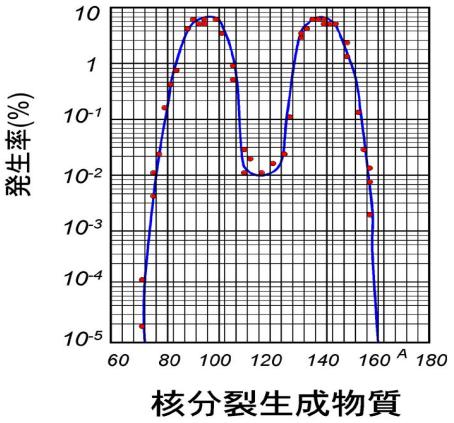
6. 環境中の放射性物質の特性

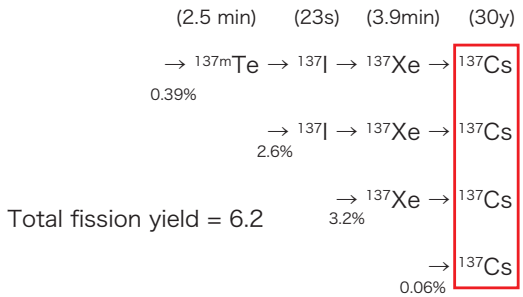
(1) 核分裂生成物

核分裂による生成物は（表 2）の核種である。核分裂生成物が崩壊して、セシウム 137 が生成されるが、これは直接的な分裂生成物ではない（図 14）。セシウム 133 が生成され、次に放射化によってセシウム 134 が生成される。（図 15）。また、核爆発ではセシウム 134 は生じない。

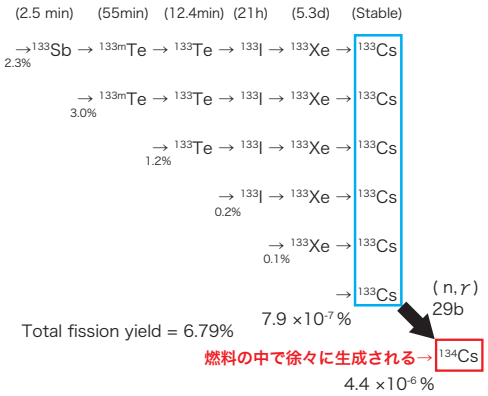
記号	核分裂生成物の名前	できる割合
^{85}Kr	クリプトン -85	0.3%
^{89}Sr	ストロンチウム -89	4.8%
^{90}Sr	ストロンチウム -90	5.8%
^{93}Zr	ジルコニウム -93	6.3%
^{95}Zr	ジルコニウム -95	6.2%
^{99}Te	テクネチウム -99	6.1%
^{129}I	ヨウ素 -129	0.7%
^{131}I	ヨウ素 -131	3.1%
^{135}I	ヨウ素 -135	6.3%
^{133}Xe	キセノン -133	6.6%
^{135}Xe	キセノン -135	6.3%
^{133}Cs	セシウム -133	6.8%
^{137}Cs	セシウム -137	6.1%
^{144}Cs	セシウム -144	6.0%
^{147}Pm	プロメチウム -147	2.3%

▲表 2　核分裂生成物



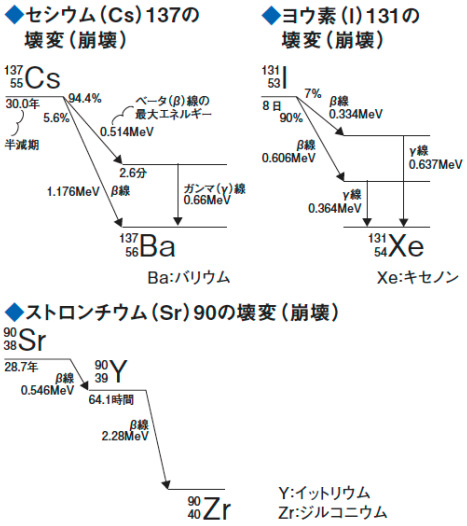


▲図 14　核分裂における Cs-137 の生成



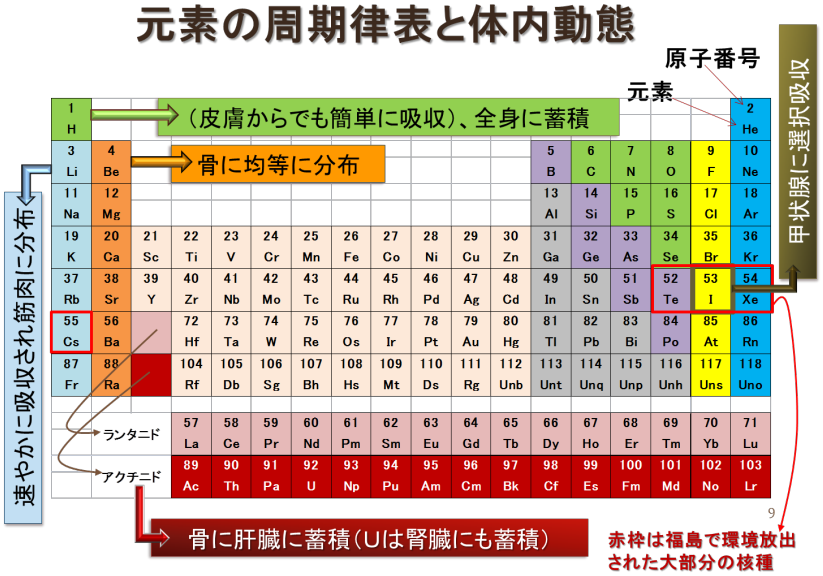
▲図 15　核分裂における Cs-133 と Cs-134 の生成

(2) 壊変（崩壊）



▲図 16　放射性物質の壊変（崩壊）図

(3) 放射性元素の特性



元素名	セシウム	ヨウ素
元素記号	Cs	I
分類	金属元素	非金属元素
電子配置	6s1	4d105s25p5
英語	Cesium	Iodine
原子量	132.9	126.9
同位体	133Cs、134Cs、135Cs、137Cs	127I、129I、131I
融点	28.44℃	113.7℃
沸点	671℃	184.3℃
密度	1.88 ～ 1.93g/cm3	4.93g/cm3

▲表 3 放射性元素　セシウムとヨウ素の特性

■解説

原子力発電所は核燃料が核分裂を起こして熱を出している。ウランは 235、238 燃えるのは 235 という原子番号ではなくて質量数のウランがある。それが崩壊すると質量数でいうと 90 番台と 140 番台が異常に高く、量が多い。ストロンチウム 90 は崩壊するとイットリウム 90 になり、高いベータ線を出す。だから原発で働いている人たちはベータ線被ばくをしていることになる。140 番台がセシウム 137、134、ヨウ素 131。核分裂すると多いのは絶対量が 90 番台と 140 番台前後が多くなっている。そのうち揮発性の物で蒸気になりやすいのはヨウ素とセシウム。核分裂の中でセシウムの 137 が崩壊してできる。実際セシウムの 137 がウランから直接できるのではなく、直接できるセシウムは 0.06%しかできない。いったんキセノンとかヨウ素とかテルルとかに分解されてそれが崩壊して差し引きに半減期の長いセシウムの 137 になる。核分裂をするとセシウム 137 ができるのはいろいろな経路によるが全体として 6.2% の割合でできる。セシウム 134 は核分裂生成物ではなく、最初に核分裂したものがテルルだとかヨウ素だとかになるがその後セシウムの 133 まで崩壊する。セシウム 133 も放射性物質ではなくセシウムという安定同位体になる。燃料の中にセシウム 133 という安定同位体ができる。ところが、燃料の中で核分裂反応が起こり中性子があたるとセシウム 133 がエルガンマ反応、中性子を受け取ってガンマ線を出す放射性物質に変わる。それは燃料の中で中性子が当たって変わる。それで 134 というセシウムができる。燃料の燃え方、燃焼度によってセシウムは変わる。

今回の原子力発電所の事故ではセシウム 134 と 137 の汚染だが、原爆ではこれは出てこない。今回 2 号機から出た放射性物質がこの地表面を汚染させた。2 号機の燃料がたまたま 134 と 137 の割合が 1:1 だった。他の号機だとこの割合は変わる。3 号機は単なる水素爆発なのかそれとも核爆発のなのか、米軍は分析しているが全然そのデータは公表されていない。広島の原爆「リトルボーイ」のウラン 235 は 50kg といわれており、そのうち 800g のウラン 235 が核分裂を起こした。上空 570m のところで爆発した原子爆弾は超高温になり、爆弾中の分裂片（死の灰）、燃え残り、爆弾容器を気化させ、一気に強い上昇気流で、成層圏近くまで上昇し、世界中に拡散した。一部、「黒い雨」となって広島市北西部に降り注いだが、放射性物質（セシウム）の量は少なかった。黒い雨に当たって原爆症になった人たちがいるが、これは原発事故でできたヨウ素とセシウムだけではなくて核爆発の反応によってでてきたいろんな核種全部、それで非常に大きな被害になった。核爆弾の下だとものすごい放射能になるが数日で一気になくなる。残るのはヨウ素とセシウムだ。

チェルノブイリと福島の事故の違いは、チェルノブイリは燃料が燃えて周りに散らばったが福島は蒸気になったものだけが外に出た。燃料が爆発すると、ウラン 234、235、238、プルトニウム 238 ～ 241 が出る。プルトニウムの 241 がベータ崩壊しアメリシウムの 241 に変わる。プルトニウムはガンマ線をほとんど出さないが、崩壊してアメリシウムになるとガンマ線を出す。プルトニウムを置いておくと時間と共に線量が上がってくる。ヨウ素、ストロンチウム、セシウム、トリチウムと出る。これがチェルノブイリでは全部散らばっている。チェルノブイリの近くでは時間と共に線量が上がるところがある。これはアメリシウムが原因だ。とても人が住めるような状況ではない。一般の低いところでも、セシウムに対してストロンチウムが約 10 分の1ある。日本の場合は 100 分の1か 1000 分の1。セシウムだけ心配すればいいというのは日本の状況だが、チェルノブイリはストロンチウムも気にしないといけない。

ストロンチウムの測り方は、ストロンチウムはガンマ線を出さないのでベータ線を分析しなければならない。今の公式の分析法では 2 種ある。原発の地下水にもストロンチウムが出てきているがストロンチウムは土に固定されにくく移動しやすい。チェルノブイリでは近くの町ではいまだに公園を定期的に放水して粉塵が上がらないように洗い流してきれいにしている。プルトニウムの粉塵は肺の中に入ると、肺がんの原因になる。これはもともと天然にはない人間が作りだした一番の毒である。今、汚染水問題で話題になっているトリチウムは三重水素といって、陽子ひとつに対して中性子がふたつある。中性子が 1 個だと重水素という。海の中には重水素と酸素が結びついた重水があり、それを分離すると重たい水が分離される。これは核兵器を作るためのプルトニウムを作る原子炉に使われる水。昭和電工が戦中、重水の分離装置を大量に作った。それで海水を集めて重水を何百トンと分離した。原爆を作るために。電気分解をしてやると、軽い H^2O は水素と酸素に分かれて気体になるが、重たい重水は残る。これを時間をかけてずっと電気を使って重水だけを集めるというまさに軍事技術。同じような方法でないとトリチウムは分離できない。なので放射性物質を ALPS という機械で放射性物質を取ってトリチウムだけ残るが、トリチウムは水と同じ物なので分離するには装置が必要でごくわずかしか取り出せない。アメリカのスリーマイル島事故でも同じ問題が出てきた。トリチウムを捨てるにはどうしたらいいか。アメリカでは大気中に蒸発させた。日本では、蒸発させると雨が降るとすぐそのまま落ちてくるので止めようということになっている。今のところ、みんなが海に捨てるのはやむを得ないんじゃないかといっているが。トリチウムは同じ放射能でもエネルギーが低く体の中に入っても影響は少ない物質ではある。

■周期表の解説

放射性物質もこの元素の種類によって同じような性質を有している。縦に同じような性質。不活性ガス （ラドンの列） キセノンガス、クリプトンガスも同時に流れ出ている。あまり心配しなくてもいい。通り過ぎれば OK。それに対して横に 1（個）列ずれるだけで性格が全く変わってしまう。ここはハロゲン物質といわれる、フッ素、塩素、臭素、ヨウ素。非常に反応性が高い。塩素は漂白剤ですぐに反応する。

今回出たのがヨウ素は体に入ってきたら取り込まれて甲状腺に集まる性質がある。今問題になっているのがストロンチウムでその上の元素、カルシウム、骨。この列は骨に均等に分布する。骨に集まる性質がある列。ストロンチウムは体に入ると骨に集まる。ストロンチウム 90 を骨のがんで苦しんでいる人に注射すると骨がんの人は活発に細胞分裂をしているので放射性ストロンチウムはそこに集まる。そこからベータ線を出すとがんが消えていく。それをカルシウムと同じ動きをするということを利用した方法。この隣の列、ナトリウム、カリウム、ルビジウム、セシウム、フラチウムは速やかに吸収され筋肉に分布する性質を持つ。カリウム、ナトリウムは電解質として血液中にある。カリウムがなくなると筋肉が動かなくなる。周期律表からそれぞれの放射性物質の性質が推測することができる。甲状腺は人の活動に重要な役割を持っていて、元気に動けるのも成長するのもこの甲状腺の働きのおかげだ。ホルモンを出すのに必要な元素がヨウ素。この中にヨウ素がないとうまく働かない。日本人はヨウ素が集まっていて十分足りていると言われているのは海藻をよく食べているから。海藻の中にヨウ素が入っている。放射性のヨウ素が入ってきて吸ったり食べたりすると、ヨウ素欠乏症のチェルノブイリの人たちはみんな放射性ヨウ素を追い出す。それで過剰な被ばくをする。日本人は昆布を食っているので案外集まらなかっただろうと言われている。量を正確に測った上での話ではないが。ヨウ素剤を事故の時に飲ませるというのは、安定ヨウ素剤である。安定なヨウ素を十分満たしておくと、放射性ヨウ素が入っても、ここに集まらずぬ排出させるという目的で使う。この話もきりがないが飲ませる飲ませないで大騒ぎしたり、あるところでは、町長の決断で飲ませたところもあった。飲んでから何時間で、時間を計る。これがヨウ素の問題。セシウムは筋肉全体、ストロンチウムは骨、プルトニウムは肺が問題となる臓器。体の中に入ってセシウムは半減期が 30 年。実効半減期というのは、放射性物質としての半減期と体の外に排せつされる生物学的な反応をあわせて、人間の中にどれくらい放射能が残ってくるかというのをいうこと。セシウムはおおよそ 70 日で半分になる。子どもはもっと早い。ヨウ素は逆の使い方で医療関係でよく使われている。例えば、甲状腺中毒症、バセドウ氏病。これらは甲状腺の活動が活発すぎる病気で、500 メガ Bq のヨウ化ナトリウムを服用させる。これは食品の基準から比べるととんでもなく多いが、甲状腺が放射線によっておとなしくなる。最新の治療の指針では 500MBq 飲んだら家に帰っていいですよと言われる。そばによるとミリシーベルトぐらいの線量を持っている。その人は治療を受けた後、家に帰っていいのだが、1 枚の紙に注意事項が書いてある。どんなことが書いてあるかというと、最初にお風呂に入らない。お孫さんを抱かない。そういう人がトイレに入るとトイレはすごい放射能になる。周辺の人の被ばくが問題にならないようだと判断して今は問題ない。医療の世界と原発事故の世界とこんなに違う。しかし、医療について使われるの場合は多くても、病院で検査をするため、体を治すためには受け入れるという違いは非常に大きい。事故の時の放射性ヨウ素は問題になりますよといっているが、細かい話をすると、気体状に飛んできた放射性ヨウ素には 2 種類ある。無機ヨウ素といわれる、炭素がからんでいないヨウ素と有機ヨウ素といわれるもの。メチル化したヨウ化ルチン。この性質の違いが放射性ヨウ素を防護するために非常に重要なことだ。無機ヨウ素は活性炭や水で簡単に止まる。しかし、有機ヨウ素は活性炭では止まらない。水でも止まらないでそのまま体に入る。有機ヨウ素がどれ位あるかによって被曝量が異なる。

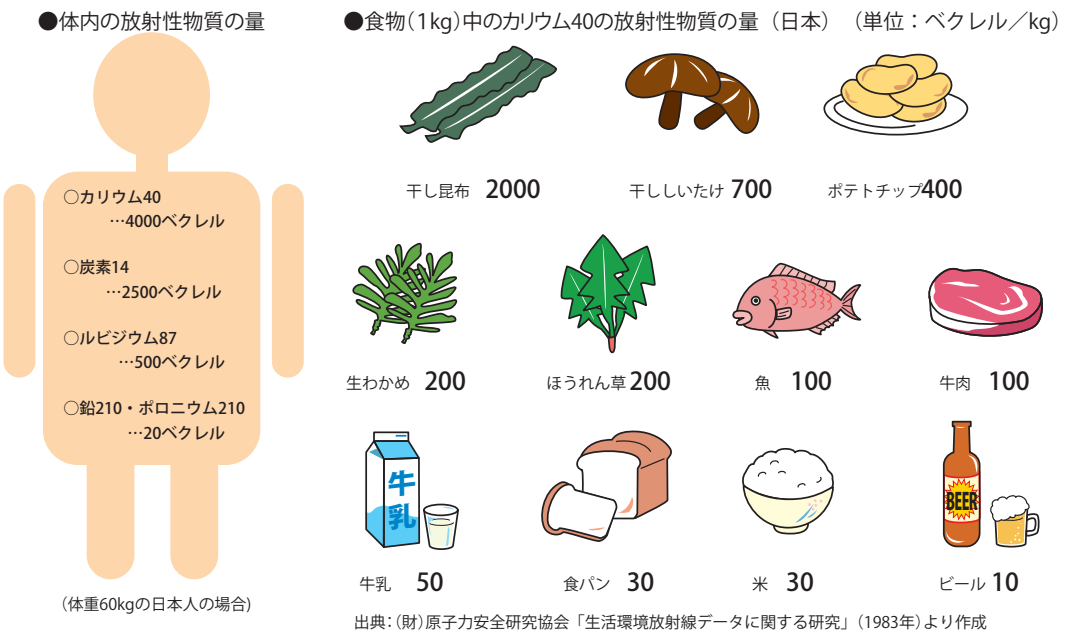
セシウムの挙動をいろいろ知る上で、土壌からセシウムをどうやって除去するかという研究がなされた。熱せれば、671 度が沸点なので熱くすれば飛ぶだろうという考えて加熱したが飛ばない。土とくっついていると飛ばない。なぜかというとアルミとケイ素と酸素とセシウムが結合したような化合物になっているからだ。ペレット工場である添加物を入れるとセシウムが抜けるという。ある添加物とは消石灰。公表されていない。1200 度まで上げるとほぼ 100% 近くセシウムを分離することができる。木材についたセシウムは水洗いとか高圧洗浄とかいろいろやっている。少なくても有機物の場合はセシウムはあまり固定されていないので水洗いや高圧洗浄をするとある程度は落ちる。土壌、コンクリートを高圧洗浄すると今度は廃液が出るので凝集沈殿剤を入れて分離する。汚れを落とす薬剤。上澄み液はきれいな水が取れてここにはセシウムはほとんど含まれていない。泥にセシウムが吸着して理論上のセシウムがないということになる。ポイントなのは理論上とセシウムがないというのが、ゼオライトでは意味がないと。ゼオライトが捕集するのは理論上のセシウム。なのできれいな水が取れる

3. 放射線の影響

1. 放射線の影響

■身の回りにある放射線

私たちは、宇宙から地球に降り注ぐ宇宙線を受けていて、この宇宙線は放射線の一種である。高度の高い位置に行くほど、より多くの宇宙線を受けることになる。例えば、ジェット機で東京ーニューヨーク間を往復（約２０時間）した時の宇宙線から受ける放射線量は、約０．２ミリシーベルトになる。また、大地の岩石や土などに放射性物質が含まれているため、大地からも放射線を受けている。この他、私たちは、食べ物や飲み物、呼吸によって体に取り込んだ放射性物質から放射線を受けている。例えば、カリウムは自然界に存在するミネラル成分の一元素であり、人間の体内の塩分を低下させ血圧の上昇を制御するなど健康を保つために必要不可欠な元素である。このカリウムには、カリウム４０という放射性物質がごく僅か（0.01 2%程度）含まれていて、カリウム４０は食べ物と一緒に体内に取り込まれる。こうした放射性物質は、時間の経過によって少なくなり、また、新陳代謝されるため、体内でほぼ一定の割合に保たれている。

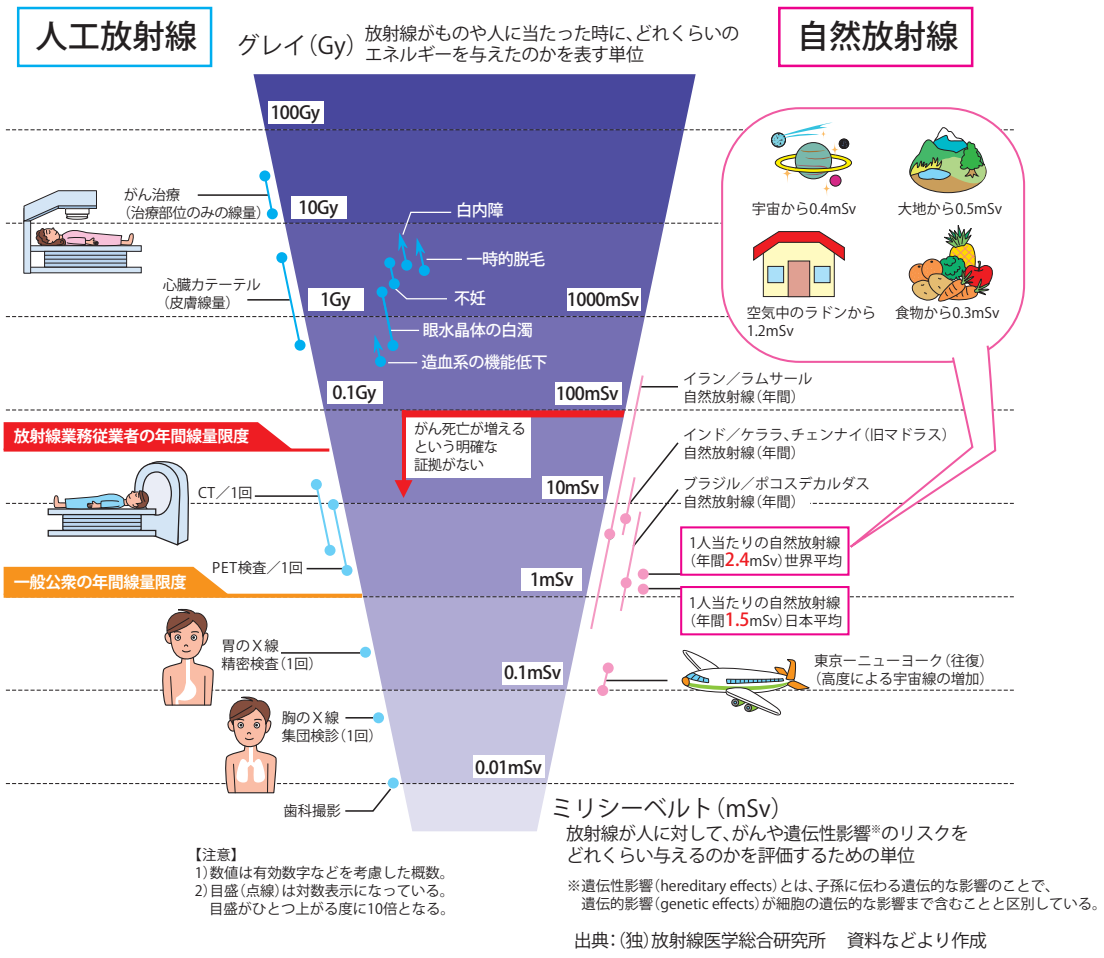


▲図 17 体内、食物中の自然放射線

■自然放射線と人工放射線

私たちの生活環境には、自然から受ける放射線と人工的に作られた放射線が存在している。人類は、地球の誕生以来、宇宙から地球に降り注いでいる宇宙線や大地、飲食物などからの放射線を受けてきた。これらを「自然放射線」といい、私たちは、年間一人当たり約 2.09 ミリシーベルト（日本平均）の自然放射線を受けている。１８９５年にレントゲン博士によりエックス（X）線が発見され、今では医療や工業、農業などで色々な用途に利用するため人工的に放射線が作られている。これらを「人工放射線」といい、病気の診断などに用いられるエックス(X) 線撮影や CT などのエックス（X）線、核分裂のエネルギーを取り出す原子力発電所で生まれる放射線などがある。

■放射線による人体の影響



▲図 18　身の回りの放射線被ばく

放射線の発見以降、研究や利用による研究者や医師などの過剰な被ばくや広島・長崎の原爆被災者の追跡調査などの積み重ねにより、放射線による人体への影響が明らかになってきている。

放射線が人体へ及ぼす影響の一つは、被ばくをした人の体に現れる身体的影響である。**身体的影響は、急性障害、胎児発生の障害及び晩発性障害**（長期間の潜伏期を経てがんなどが発生する）**などに分類される。**また、被ばくをした本人には現れず、その子孫に現れる**遺伝性影響**についても研究されているが、遺伝性影響が人に現れたとする証拠は、これまでのところ報告されていない。

国際的な機関である**国際放射線防護委員会（ICRP）**は、一度に 100 ミリシーベルトまで、あるいは 1 年間に 100 ミリシーベルトまでの放射線量を積算として受けた場合でも、線量とがんの死亡率との間に比例関係があると考えて、達成できる範囲で線量を低く保つように勧告している。また、色々な研究の成果から、このような低い線量やゆっくりと放射線を受ける場合について、がんになる人の割合が原爆の放射線のように急激に受けた場合と比べて 2 分の 1 になるとしている。

ICRP では、仮に蓄積で 100 ミリシーベルトを 1000 人が受けたとすると、およそ 5 人ががんで亡くなる可能性があると計算している。現在の日本人は、およそ 30% の人が生涯でがんにより亡くなっているので、1000 人のうちおよそ 300 人であるが、100 ミリシーベルトを受けると 300 人がおよそ 5 人増えて、305 人ががんで亡くなると計算される。被ばくによるがんのリスクについての ICRP の「公式の考え」は以下

の通り。

・自然被曝以外に、実効線量が通算で 1 シーベルト（1 Sv）の放射線をじわじわと被曝すると、癌による生涯死亡リスク（生涯のあいだに癌で死亡する確率）が 5 パーセント上乗せされる

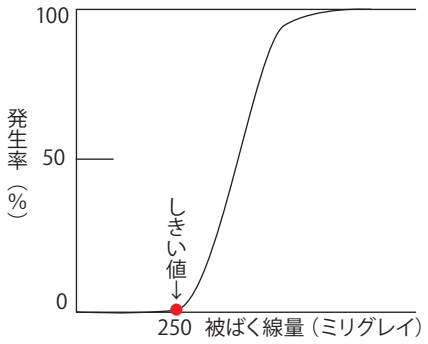
・癌による生涯死亡リスクの上乗せは、（自然被曝以外に）被曝した実効線量に比例する。

なお、自然放射線であっても人工放射線であっても、受ける放射線量が同じであれば人体への影響の度合いは同じである。

■確定的影響と確率的影響

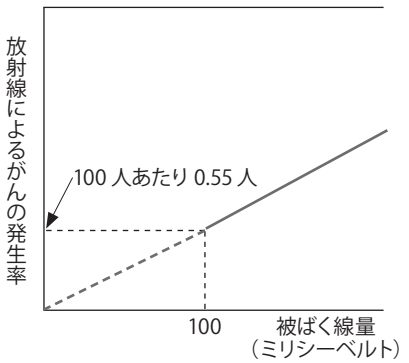
▼表 4　人体への影響と分類の症状

分類	症状	現れる時期
確定的影響	一時的不妊	急性影響（被ばく後すぐに）
	白血球減少	
	脱毛	
	皮膚の紅斑	
	白内障	晩発影響（長期の潜伏期間がある）
確率的影響	白血病	
	がん	



▲図 19　確定的影響
しきい値のある影響の例：白血球の減少

250 ミリグレイを超える放射線を受けると、白血球が減少する人が出てくる。



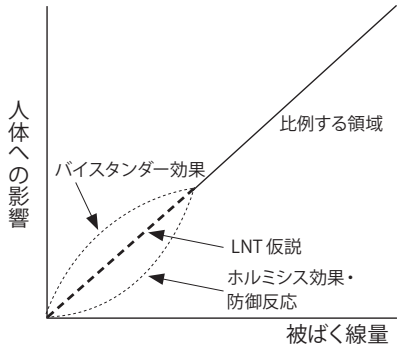
▲図 20　確率的影響
しきい値がないと仮定する影響の例：がんの発生

放射線をあびた時、人体にどのような影響が生じるのであろうか。放射線の人体への影響は「**確定的影響**」と「**確率的影響**」に分けられる。影響の分類と代表的な症状を表 4 に示す。また、図 19,20 に被ばく線量と影響の概要を示す。

「確定的影響」は、ある個人が短時間で大きな線量を被ばくしたとき、その直後にあらわれるもので、ある線量 (しきい値) を超えると発生する。たとえば、男性の一時的不妊やリンパ球の減少などが該当する。このしきい値の最も小さいものは個人差があるものの 150mSv 程度とされている。つまり、この値以下の被ばく量であれば「確定的影響」は発生しないことになる。これに対し、「確率的影響」はある集団が被ばくしたことによって、将来（被ばくしてから長期間経過したのちに）がんになったり白血病などになったりする確率が上昇することである。

「確率的影響」は広島や長崎で被爆された方の疫学的調査から100mSv以上のときは線量と比例する影響があるとされている。100mSv以下（これを低線量といってよいかは別として）の低線量の放射線被ばくの影響はどこまでわかっているのであろうか。実は、低い線量を被ばくしたときの発がんなどの人体への影響については必ずしも明らかではない（＊注）。このため、ICRPはこの領域の被ばくでは線量に比例する影響があると仮定して、100mSvでの危険度と線量が0mSvである原点との間に直線を引くことを提案しており、これをしきい値がなく直線性の影響があるモデル（**ＬＮＴ仮説**）という。一般的な放射線防護の考え方や被ばく線量の制限値はこの仮説をもとにしている。

▼図21　低線量被ばくにおける被ばく線量と人体への影響の関係



これに対し、最近の研究では放射線をあびた細胞以外の周辺の正常な細胞にも影響が生じるということが報告されている（**バイスタンダー効果**）。これによると、ＬＮＴ仮説より高い確率で人体への影響が生じることになる。これに対し、低いレベルの放射線は体に良いという**ホルミシス効果**が動物実験によって報告されたことがある（その後、低い線量の被ばくを受ける人たちでも同様な傾向があるとの報告があるが、まだ定説とはなっていないようである。）。この場合は、ＬＮＴ仮説より人体への影響は少なくなることになる。ＬＮＴ仮説での比例領域では、バイスタンダー効果またはホルミシス効果などにより多少直線からずれることがあるかもしれないが、いずれにしても100mSv以下ではがんの発生確率は減少する曲線となるであろう。

しかし、ＬＮＴ仮説では放射線防護の観点から、線量がある限りがん発生リスクがあると考えていろいろな基準を設定している。つまり、どんなに低い線量であってもがんになることであり、安全な被ばく線量とか安全な汚染状況というのはあり得ないことになる。このため、どこまでが危険でどこなら安全かということを決めることは容易ではない。

事故直後の報道では放射線の量や放射性物質による汚染が報告されるたび、「直ちには健康に影響が表れるものではない。」と発言があった。線量率の測定値からみると「確定的影響」に相当する150mSvに達することは無いだろう。しかし、ＬＮＴ仮説によれば被ばくした線量がいくら小さくてもある確率で人体影響が生じることになるため「確率的影響」はあるかもしれないことを考慮した発言と思われる。

＊注：低レベル放射線の影響による発がんは、その他の原因とされる喫煙や加齢、化学物質などによるものと区別できない。このため線量が低いほど放射線の影響を確定することが困難である。

2. 外部被ばくと内部被ばく

放射性物質が体の外部にあり、体外から被ばくする (放射線を受ける) ことを「**外部被ばく**」という。一方、放射性物質が体の内部にあり、体内から被ばくすることを「**内部被ばく**」という。外部被ばくは、大地からの放射線や宇宙線などの自然放射線とエックス (X) 線撮影などの人工放射線を受けたり、着ている服や体の表面 (皮膚) に放射性物質が付着 (汚染) して放射線を受けたりすることである。放射線は、体を通り抜けるため、体にとどまることはなく、放射線を受けたことが原因で人やものが放射線を出すようになることはない。

内部被ばくは、空気を吸ったり、水や食物などを摂取したりすることにより、それに含まれている放射性物質が体内に取り込まれることによって起こる。

■外部被ばく

2011 年 3 月の原子力発電所事故の後は、東日本の広い範囲の地面に放射性物質が降り注いだため、それらが出す放射線を浴びることで、これまでになかった外部被曝をするようになった。事故のすぐ後、原子力発電所に比較的近い地域では、キセノン 133、ヨウ素 131 などの半減期が短めの放射性物質からの外部被曝もあった。しかし、事故から 1 ヶ月以上過ぎた頃からは、外部被曝の主な原因はセシウム 134 とセシウム 137 からの放射線になった。これら放射性セシウムによる外部被曝は、この先、何年間も続く。アルファ線、ベータ線、ガンマ線のうち、アルファ線とベータ線は空気中を少し進むだけでたちまち弱くなって (実質的には) 消えてしまう。また、ベータ線はたとえ体にあたってもほとんどが皮膚に吸収されてしまう。皮膚は体の中でも特に被曝に対して強いので、ベータ線の外部被曝は通常は問題にならない。

少なくとも今の日本では、外部被曝については、ガンマ線だけが問題になると考えてよい。体にあたったガンマ線のだいたい半分は、体の中の原子と衝突しないで、そのまま体をすり抜けて行ってしまう。体をすり抜けると聞くと気持ちがわるいが、実際には、このようなガンマ線は体にはまったく害を及ぼさない。体に入ったガンマ線のうち、体をつくっている原子と衝突して電離作用をおこしたものだけが、生体分子を壊して体に悪さをするのだ。

■内部被ばく

私たちが口にする天然の食品にはカリウム 40 という放射性物質が含まれている。そのため、人間の体の中にはいつでも一定量のカリウム 40 があり、私たちはそれによって内部被曝している。また、大地の底から染み出てくるラドンという気体も放射性物質だ。特に地下室などにはラドンがたまっていることがあり、それを空気といっしょに吸い込むことで、体内にラドンが入り、私たちは内部被曝する。2011 年 3 月の事故で放出された大量の放射性物質の一部は、人の体内に入って新たな内部被曝を引き起こした。特に、初期にもっとも深刻な課題だったのは、ヨウ素 131 による内部被曝の可能性だ。体内に取り込まれたヨウ素 131 は甲状腺に取り込まれ蓄積されるため、甲状腺を中心に強い内部被曝を引きおこす。1986 年のチェルノブイリの原子力発電所事故の後、周辺の地域で子供の甲状腺癌が増えたことがわかっている。これは、子供たちがヨウ素 131 に汚染された牛乳を初期の数ヶ月のあいだ飲んでいたからだと考えられている。

福島第一原子力発電所の事故の場合は、初期に空気中に放出されたヨウ素 131 を

吸入する可能性と、飲料水や食品などに混ざったヨウ素 131 を摂取した可能性があった。ただ、2011 年 3 月末に福島で行なわれたスクリーニング検査の結果を見るかぎり、福島でのヨウ素 131 による内部被曝は、チェルノブイリ周辺に比べると、桁違いに小さい。ただ、今後も、健康被害が出ないかどうかきめの細かい検診が必要である。

一方、事故から 1, 2 ヶ月が経った後では、半減期が 8 日のヨウ素 131 の影響は小さくなり、放射性セシウムによる内部被曝の可能性が重要な問題になる。ガンマ線が特に重要な外部被曝とは違って、内部被曝にはすべての種類の放射線が関わってくる。放射線源 (放射性物質) が体内にあるからだ。たとえば、放射性セシウムが体の外にあるときには、セシウムが崩壊する際に出るガンマ線だけが外部被曝に寄与するが、同じ放射性セシウムを体に取り込んでしまうと、ガンマ線とベータ線の両方から内部被曝を受ける。さらに、アルファ線は生物の細胞を激しく傷つけるので、内部被曝に大きく寄与することが知られている。

3. ベクレルとシーベルト

外部被ばくは放射性物質から遠く離れることやコンクリートなどで覆って放射線を遮蔽することなどで被ばくする放射線量を低くすることができる。これに対し、内部被ばくでは長期間被ばくが生じることになる。つまり、いったん摂取すると被ばくから逃れられないことになる。このため、「内部被ばくは危険だ。」ととられることがある。しかし、外部被ばくに比べて内部被ばくが常に危険であることにはならない。どの程度危険であるかは人体が被ばくした量を比較する必要があり、**実効線量 (Sv)**（P28）で考える必要がある。つまり、同じ実効線量であれば同じ危険性があることになる。同様に、原発事故由来の人工の放射性物質は危険だが自然にあるものは安全である、とか医療被ばくによるものは大丈夫であるということも正しくはない。どの程度被ばくするかを正しく評価することが重要である。（ただし、医療による被ばくは医師の判断により、被験者の健康に有効であることを前提に実施されるものである点は注意する必要がある。）

ここでは、外部被ばくと内部被ばくとで、被ばく線量をどのように求めるのか、「シーベルト」と「ベクレル」の関係はどうなっているのかについて、詳しく紹介する。

■外部被ばくによる線量の計算

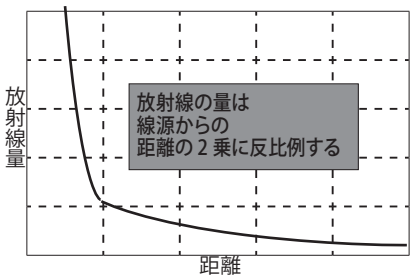
外部被ばくは人体の外にある放射性物質からの被ばくである。このような被ばくの量を求めるには二つの方法がある。ひとつはμ Sv/h の目盛があるか表示ができる測定器（一般にサーベイメータと呼ぶ）を用いて測定する方法または測定素子を利用したバッジ（一般に個人線量計と呼ぶ。）を用いて測定する方法である。

もう一つの方法は、計算による方法である。種々の放射性物質について、1 m離れた所に 1MBq の点状の小さな放射性物質があるとき、被ばくする量（μ Sv/h）がいくらになるかを換算する係数が与えられている。（たとえば、「アイソトープ手帳」参照）。代表的な換算係数を図 22 に示す。Cs-137 の場合、換算係数は 0.0927 であるから、この値を用いて次の式により線量率を求めることができる。

▼図 22 外部被ばくの線量換算係数

放射性核種	換算係数	主なガンマ線 (keV)
ヨウ素 -131	0.065	364
セシウム -134	0.249	605,796
セシウム -137	0.0927	662

換算係数：距離 1m のところに 1MBq の放射性物質があるときの線量率 (μ Sv/h)



$$\text{線量率（}\mu\text{ Sv/h）＝放射性物質の量（MBq）} \times \frac{0.0927}{\text{距離（m）の2乗}} \quad （式1）$$

この式の分母にある「距離（m）の2乗」は、図 22 に示したように、放射性物質から離れるに従って線量率が減少することを示す。これは、点光源と照度の関係と同じである。滞在時間を考慮すれば線量率（μ Sv/h）から換算して「シーベルト（Sv）」が求まる。

式1を用いると、直線状（たとえば、配管など）の放射線源は点状のものがつながっているものと仮定して計算することができる。さらに直線状のものがつながっていると考えて平面状（たとえば、壁面、校庭など）のものも計算できる。実際に計算するための計算コードが公開されているが詳細は割愛する。また、式1から、測定した線量率（μ Sv/h）から放射性物質の量（MBq）を推定することもできる。

校庭などの広い場所で、土壌中に Cs-137 が均一な濃度で存在するとき、その濃度が半分になれば、その地面に立っている人がうける線量率は 2 分の 1 になると考えてよい。つまり、このときの土壌表面の汚染の程度と地上にいる人がうける線量率は比例していることから換算をすることができる（＊注 1）。しかし、土壌に含まれる放射性物質の種類が異なれば、放出される放射線の種類やそのエネルギーによって左右されるために比例係数は異なった値を持つ。I-131 に比べて Cs-137 が放出するガンマ線のエネルギーが大きいため、換算係数も多少高めの値となっている(＊注 2)。

ここに示した計算では全身が均等に被ばくしたときを想定している。しかし、たとえば、指先だけが被ばくしたときと全身が被ばくしたときでは人体が受ける健康影響は変わってくる。このようなとき、放射線に強いか弱いかを個々の組織や臓器について補正係数（これを**荷重係数**と呼ぶ。）を用いて、全身が均等に被ばくしたときの影響に換算する必要がある。この荷重係数を表 6 に示す。この荷重係数をみると、細胞分裂する頻度が大きいものほど大きな値をとっていることがわかる。

以上のように点状の放射性物質という限られた条件ではあるが、外部被ばくにおける「ベクレル（Bq）」から「シーベルト（Sv）」を求めるための関係が得られた。

＊注 1：日本保健物理学会ＨＰ記載によれば、国際機関であるＩＣＲＵの報告書に記載されている比例係数は、Cs-137 による汚染が 1kBq/m2 のとき、0.00268 μ Sv/h

とされている。

＊注 2：I-131 が放出する主なガンマ線のエネルギーは 364keV、Cs-137 が放出する主なガンマ線のエネルギーは 662keV である。この、keV は放射線のエネルギーを示す単位である。

■内部被ばくによる線量の計算

内部被ばくとは放射性物質を含むもの（たとえば、汚染した水や食品、粉じんなど）を体内に取り込んだときに生じるものである。（＊注 3）

人間に限らず動物の体内に取り込まれた放射性物質は代謝によって少しずつ排泄されて、時間がたてば徐々に少なくなっていくことが分かっている。このとき、体内にあった量が半分になる時間を**生物学的半減期**とよぶ。たとえば、Cs-137 の物理学的半減期は約 30 年とかなり長いのだが、生物学的半減期は大人でおおよそ 70 日から 90 日程度とされている。これにより 90 日経過すると体内の放射性物質は半分になり、さらに 90 日経過すると最初の 4 分の 1 に減少、1 年経過すると約 16 分の 1 に減少することになる。

内部被ばく線量を正確に求めるには、放射性物質を吸入したり飲み込んだりしたとき、人体の中でどのように動くかを知る必要がある。ＩＣＲＰ（＊注 4）では人体をいくつかの箱（「コンパートメント」と呼ぶ）が連結したモデルを提唱している。図 23 にセシウムのコンパートメントモデルの概要を示す。食品などを飲み込むことによって Cs-137 が体内に入り込むとき（経口摂取）、取り込んだ Cs-137 の量 1Bq あたりの内部被ばく線量（mSv）の換算係数は成人にたいして、1.3×10^{-5} と与えられている。これより、次の式により被ばく線量を求めることができる。

被ばく線量（mSv）＝放射性物質の量（Bq）×換算係数（1.3×10^{-5}）　（式 2）

内部被ばくでは摂取した後、継続して被ばくが生じるのであり、この式で得られる被ばく線量は摂取した日から将来にわたってずっと積算した値である。ただし、放射性物質は物理的半減期でも減少し人体の代謝によっても体外に排泄されるので、無限期間で積算するわけではない。この積算期間は成人で 50 年間、乳児で 70 年間として計算されている。

なお、式 2 で用いた換算係数は放射性物質の種類ごとに、また年齢別（乳児、幼児から成人の 5 種類）にそれぞれ値が公表されている。吸入摂取と経口摂取したときの代表的放射性物質についての換算係数の値を表 7 に示す。一般的に吸入摂取したとき一部は肺の中に入ってしまうので排泄が比較的遅いのに対し、経口摂取では主に消化管を経由して早く排泄されるため、換算係数は経口摂取のほうが小さい。

また、内部被ばくでは放射性物質が体内に分布することによって、個々の臓器が異なる被ばくをするため、前項に記載した個々の組織や臓器についての荷重係数を考慮している。

内部被ばくのみまたは外部被ばくのみが生じるときもあれば、両者が同時に起こるときもある。前述の式 1 と式 2 で同じ単位の Sv で算出されるので、これを合計することで人体への影響を示す「ものさし」が計算できる。しかし、実際には外部被ばくは実測できる量であるのに対し、内部被ばくは将来を予想した計算値であり、体格などの個人差や生活習慣によっても違いが生じる可能性がある。このため、平成 23

年３月17日に厚生労働省食品が発表した「放射能汚染された食品の取り扱いについて」に記載された野菜や飲料水などの暫定基準値の算出では十分な尤度をもった算出を採用した。なお、その後、より低いレベルでの新しい基準が検討されつつある。

＊注３：環境中には天然に存在するカリウム－４０などの放射性物質がある。カリウム－４０は必須元素のカリウムに0.012%含まれており、これによる内部被ばくも常に生じている。

＊注４：International Commission on Radiological Protection（国際放射線防護委員会）の略。放射線被ばくや防護に関する勧告を行う国際的な機関（P21）

4．放射線の線量

■グレイとシーベルト

グレイとは、単位質量当たりのエネルギー吸収量で定義される「**物理量**」である。シーベルト★（1 ここでは「実効線量」の単位として用いられている）は、被ばくによる将来の発がんリスクを簡略的に数値化した放射線防護のための「指標★2」である。この指標は、放射線に対して感受性の高い乳幼児なども含めて評価されている。実効線量は、がん、白血病、遺伝性影響などの確率的なの白内障などの確定的な影響★4の線量指標には使用できない。確定的な影響が生じそうな被ばくの線量を表す単位には、グレイを使用するのが適切である。

★1 「シーベルト」という単位は、実効線量のみならず、等価線量や1センチメートル線量当量（＊注）（「はかるくん」などによる測定表示のための量）など、異なる定義の数量にも使用されるので注意が必要である。

★2 人体が受けた放射線の種類や受けた人体の部位（臓器・組織の別）の放射線に対する感受性で重み付けをしてグレイを基に計算される。

★3 確率的な影響：線量の増加とともに現れる確率が増加すると見なされる影響。（P22）

★4 確定的な影響：あるレベルの線量を超えると必ず現れる影響。重篤度は、線量とともに増加する。（P22）

■実効線量と等価線量

人体への影響を表す方法として、実効線量と等価線量がある。単位は、同じシーベルトである。

等価線量：人体のある臓器・組織が放射線を受けた時の影響に放射線の種類による影響の大きさを加味した線量を表す。

等価線量＝吸収線量×放射線の加重係数

実効線量：それぞれの臓器・組織が受けた等価線量に臓器・組織（臓器・組織1からNまで）の影響について重み付けをして足し合わせたものである。

実効線量＝（臓器・組織1の等価線量×臓器・組織1の加重係数）＋
…＋（臓器・組織Nの等価線量×臓器・組織Nの加重係数）

（注＊） 1センチメートル線量当量は、実効線量が測定器を用いて測定できない線量であるため、測定可能な実用的な線量として導入された。これは、どのような放射線がどのように人体に入射した場合でも、必ず実効線量を安全側に評価できる量になっている。日本の法令では、1センチメートル線量当量を実効線量とみなすように決めている。

表 5 ◆放射線加重係数

放射線の種類	放射線加重係数
光子（ガンマ線、エックス線）	1
電子（ベータ線）	1
陽子	2
アルファ粒子、核分裂片、重い原子核	20
中性子線	2.5 ～ 2 0

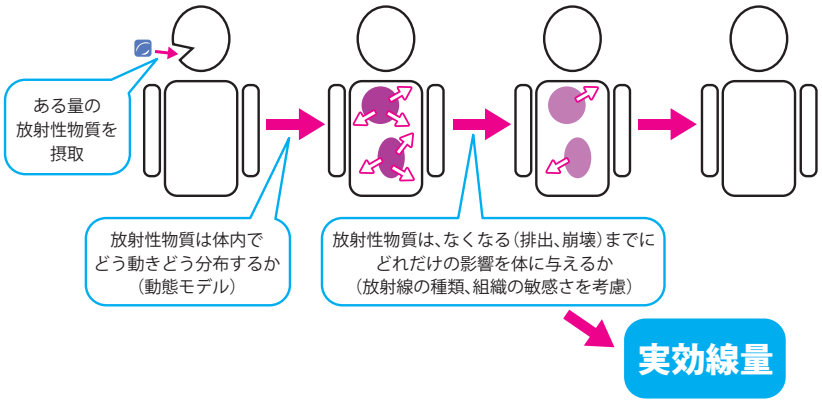
表 6 ◆組織加重係数

組織・臓器	組織加重係数	組織・臓器	組織加重係数
赤色骨髄	0.12	食道	0.04
結腸	0.12	甲状腺	0.04
肺	0.12	唾液腺	0.01
胃	0.12	皮膚	0.01
乳房	0.12	骨表面	0.01
生殖腺	0.08	脳	0.01
膀胱	0.04	残りの組織・臓器	0.12
肝臓	0.04		

表 7 ◆内部被ばくの線量換算係数 (単位 :mSv/Bq)

放射性核種	経口摂取	吸入摂取
ヨウ素 -131	1.6×10^{-5}	1.5×10^{-5}
セシウム -134	1.9×10^{-5}	2.0×10^{-5}
セシウム -137	1.3×10^{-5}	3.9×10^{-5}

図 23 ◆内部被ばくの実効線量を評価するための考え方



■ベクレル（放射能）からシーベルト（線量）への換算

「ここの地面は 1m^2 あたり○○ベクレルなんですが、被ばくは何シーベルト?」とか「この野菜は○○ベクレル検出されたが、食べると何シーベルトになりますか?」といった質問はよくある。しかし、ベクレルとシーベルトの相互換算は、そう簡単ではない。

まず、

①知りたい線量は外部被ばくによる線量なのか内部被ばくによる線量なのか見極める。

②それぞれに適した換算をする。

③評価する放射性核種の種類や被ばくの対象となる個人を事前に定めておく。

そして、注意点としては、

●換算は緻密なものであり、専門家による緻密なシミュレーションに任せることも必要。

●ここで取り上げる換算式は大まかなものであり、目安程度と考えるべきであり、環境の状況に応じて 1 桁程度のずれもあり得る。

例題 1

2011 年 3 月の放射性物質の放出の激しかった時期、場所によっては空気 1 立方メートルあたりにヨウ素 131 が 200Bq ほど含まれていた（その後、空気中の放射性物質は格段に少なくなった）。成人は（1 日で平均して）1 時間あたり約 1 立方メートルの空気を呼吸するので、このような場所にいれば、1 時間あたり約 200Bq のヨウ素 131 を吸入摂取することになる。ヨウ素 131 の実効線量係数は、**7.4×10^{-9} Sv/Bq** なので成人が 1 時間あたりに被曝する実効線量は

$200\text{Bq} \times 7.4 \times 10^{-9}\ \text{Sv/Bq} \fallingdotseq 1.5 \times 10^{-6}\ \text{Sv} = 1.5\ \mu\text{Sv}$

となる。

これが 1 時間の被曝量だから、同じ被曝が続くなら、ここにトータルの時間をかけただけの被曝をすることになる。これは、ずっと続いてもらっては困る被曝量だ（続かなかったわけだが）。

例題 2

2011 年 3 月 17 日以降の飲料水の暫定基準では、1 リットルの飲料水に含まれる放射性物質の上限は、ヨウ素 131 が 300 Bq、放射性セシウムが 200Bq だった。基準をぎりぎり満たす水を 1 日に 2 リットル飲むとすると、ヨウ素 131 を 600 Bq、セシウム 134 を 200 Bq 、セシウム 137 を 200 Bq 摂取することになる。これによる成人の 1 日の内部被曝の実効線量は、

ヨウ素 131　**2.2×10^{-8} Sv/Bq**

セシウム 134　**1.9×10^{-8} Sv/Bq**、セシウム 137　**1.3×10^{-8} Sv/Bq** であるから、

$600\ \text{Bq} \times 2.2 \times 10^{-8}\ \text{Sv/Bq} + 200\ \text{Bq} \times 1.9 \times 10^{-8}\ \text{Sv/Bq}$
$+ 200\ \text{Bq} \times 1.3 \times 10^{-8}\ \text{Sv/Bq} \fallingdotseq 20\ \mu\text{Sv}$

と換算できる。

例題 3

ある成人男性は秋になると山で野生のキノコをと採って調理して食べていたキノコがセシウム 137 に汚染されたため、この人はキノコのシーズンに通算で 1000 Bq のセシウム 137 を摂取した。これによる内部被曝の実効線量は、**1.3×10^{-8} Sv/Bq** な

ので

1000 Bq × 1.3 × 10^{-8} Sv/Bq = 1.3 × 10^{-5} Sv = 0.013 mSv

となる。

年間の被曝線量としては小さい。

例題 4

広く均一に汚染が広がった土壌からの外部被ばくの場合は、深さ方向の放射能分布を代表的な条件で仮定し、1m^2 あたりの放射能 [kBq/m^2] がわかっていれば、地上の高さ 1m の場所の線量率として以下のように求められる。

単位面積あたりの放射能の強さ [kBq / m^2] ×換算係数 [(μSv / h) / (kBq / m^2)]
= 代表的な空間線量率 [μSv / h]

換算係数の例

物質名	換算係数 (μGy/h) / (kBq / m^2)	換算係数 (μSv / h) / (kBq / m^2)
I-131	0.00174	0.00139
Cs-137	0.00268	0.00214

「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定」及び「原子力安全委員会環境モニタリング指針」を参考に作成

以上のことからセシウム 137 による 1,000 [kBq / m^2] の汚染が観測されている広い土壌地区の場合、その付近の空間線量率のおおよその見積を求めてみる。

1,000 [kBq / m^2] × 0.00214 [μSv / h] / (kBq / m^2)] = 2.14 [μSv / h]

さらに、自然放射線の線量率、約 0.04 [μSv / h] を加えた、

2.14 + 0.04 = 2.18 [μSv / h]　　となる。

■預託実効線量

内部被ばくの場合、体内に入った放射線核種の量、つまり放射能の強さ [Bq] が分かっていれば、

体内に入った放射能の強さ [Bq] × 実効線量係数 [μSv / Bq]
= 内部被ばく線量 [μ Sv]

で換算できる。この内部被ばく線量のことを**預託実効線量**という。これは、被ばくの対象が成人であれば摂取したときの年齢から 50 年間、子どもであれば 70 歳までの**被ばくの総線量を、最初の 1 年間でまとめて受けた（預託した）ものと仮定した線量**である。体内に入った放射性物質は、物理的半減期で減るか、代謝で体外に放出されるか（生物的半減期に支配される）しない限り、体内で放射線を出し続ける。その状況を考えると、放射性核種の種類によっては被ばく線量を追跡すべき管理期間が長くなってしまう可能性があるので、より合理的な被ばく管理を実現するために、放射線管理の現場では、内部被ばく線量の評価に預託実効線量を使う。

II　放射線測定

1. 放射線と放射性物質の測定の概要

1.　放射線測定の特徴

放射線や放射性物質の量を測定することが、重量測定や電流計などによる測定と最も違うのは、測定結果に「**ゆらぎ**」があることと「**自然計数値**」が生じることである。

・「ゆらぎ」とは

たとえば、重量や長さを測定するとき、同じものを同じ測定器で測定すれば、繰り返して測定してもほとんど同じ値が得られる。しかし、放射線の測定では同じように測定していても、測定するごとに得られる値が少しずつ異なることがある。

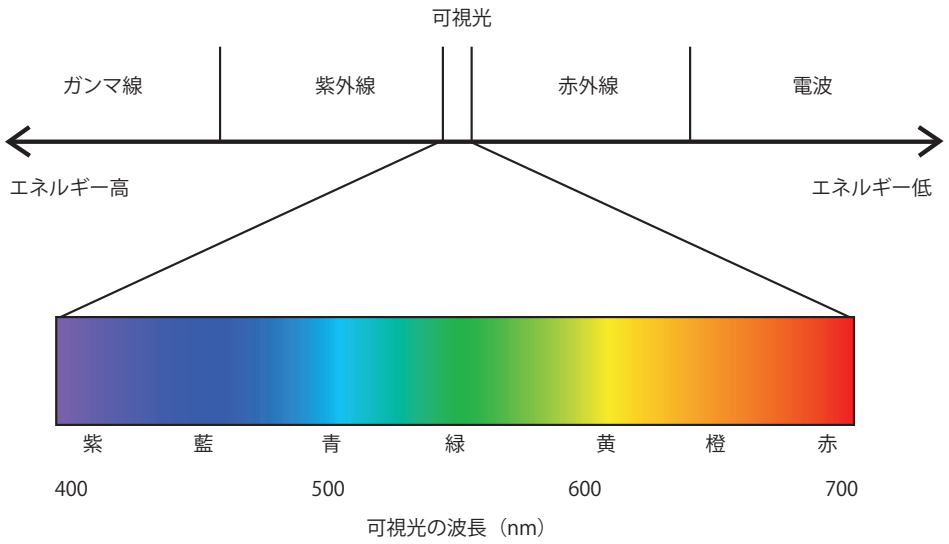
・「自然計数値」とは

長さや重さのないものを測定したときは、何らかのプラスの測定値が出ることはあり得ない。一方、放射線の測定では、放射性セシウムなどが周囲にない場合であっても、周辺の自然放射能や検出器自体が持っている自然放射能などによって測定結果が全く「0（ゼロ）」にはならないことがある。

このような「ゆらぎ」と「自然計数値」がもたらす「検出されず」という表現はなかなか理解しにくいものになっている。

Q1　どうして光の一種であるガンマ線は見えないのか？　普通の光は見えるのに？

ガンマ線はエネルギーの大きい光である。図 24 に示すように、光のスペクトルで見ると人間が見える可視光の範囲は 400 から 700 nm（ナノメートル）程度であるのに対し、ガンマ線の波長は紫外線よりももっと短く（エネルギーが高く）、1nm 以下である。このため紫外線も含めてガンマ線は人間の目では見えない。



▲図 24　光のスペクトル

Q2　放射線を測定するときの「ゆらぎ」はどうして起こるか?

「1Bq とはある放射性物質が 1 秒間に 1 回放射線を出して別な物質に変わる（これを壊変と呼ぶ。）ことを示す。非常に多くの Cs-137 原子があって、そのうちのいくつかが、ある確率で自然に壊れるとき、1 秒間あたりの壊変数が 1 回観察されることが 1Bq である。」

つまり、時間あたりの壊変数は非常に多くの原子のうち、一定の確率で放射線を放出した回数である。このとき、必ずしも壊変が同じ時間間隔で起こらないので、図 25 のようにある値を中心に少し多かったり少なかったりする「ばらつき」が生じる。これにより検出される放射線の数にも「ゆらぎ」が起こり、測定の都度表示される値が異なることがおこる。

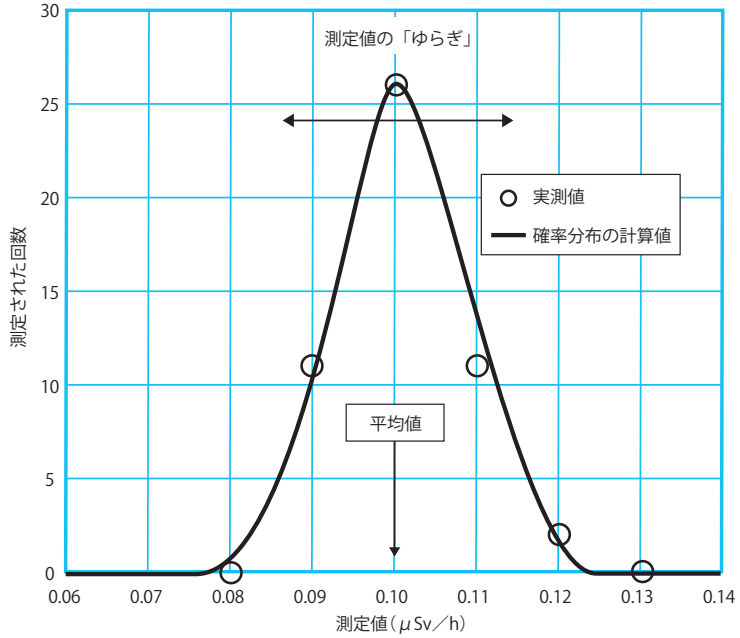


図25　放射線測定の「ゆらぎ」の実測例

測定器：TCS−171（日立アロカメディカル社製）
測定回数：50回
測定間隔：30秒

実測値の頻度分布

測定値	回数
0.08	0
0.09	11
0.10	26
0.11	11
0.12	2
0.13	0

Q3　「自然計数」はどうして起こるのか?

福島原発から放出された放射性物質以外にも、環境中には天然に存在するカリウム -40（K-40）などの放射性物質がある。K-40 はカリウム中に 0.012% 含まれていて、K-40 からは 1461keV のエネルギーを持つガンマ線が放出される。カリウムは環境の様々な物質中に多く含まれているため、このガンマ線が検出器に入射することによって、放射性セシウムなどの放射性物質がない場合であっても「自然計数」が生じる。K-40 以外にも、天然に存在するものではウランやトリウムなどがあり、これらからも多くのガンマ線が放出される。

比較的簡単に遮蔽できるアルファ線やベータ線と違ってガンマ線を遮蔽することは難しいことや検出器自体にも K-40 などが含まれていることから、「自然計数」を完全に除去することはできない。

Q4 「検出されず」は0Bqなのか?

もし、自然計数の全くない理想的な測定器であれば、放射線が少しでも入射すると、それを検出することができる。しかし、実際の測定器では自然計数があるため、その自然計数自体の「ゆらぎ」によって検出できる量に制限(これを「**検出限界**」と呼ぶ)が生じる。そのため、**「検出されず」と判断されたときであっても、放射性物質の濃度は必ずしも 0Bq/kg を意味するわけではない。**この、検出できる量は自然計数に左右されるため、測定器周辺からの影響を取り除くために遮蔽している材質(一般に、密度の大きい鉛が多用されている。)や厚みに依存する。

検出限界の値は自然計数以外に測定試料の重量や測定時間、測定器の効率などの影響も受ける。測定試料の量が多ければ検出できる放射性物質の濃度は低くなり、測定時間を長くすることによっても同じ効果がある。また、放射線の測定効率が高くなれば、より低い濃度まで測定することができる。

なお、この「検出されず」を「**Not Detected:ND**」や「**不検出**」と表記することがある。「検出されず」と表示されている場合、その具体的な検出限界値(Bq/kg)がいくらであるかを確認することも重要である。

2. 測定の原理

放射線をどうやって測定すれば良いのか。もし、放射線が全く物質と相互作用しないなら測定することはできないし、人体に何も影響することがないから測定すること自体が不要になる。たとえば、小柴氏のノーベル物理学賞の対象となったニュートリノなどのように、宇宙線のなかには人体とほとんど何も反応せずに、ただ通過しているだけのものもある。

一方、ガンマ線などの放射線が物質を通過するとき、物質を構成する原子(原子核と周りを回っている電子)に対して起こる最も重要な反応は「**電離作用**」と「**励起作用**」である(P37-38　図 28,29,30)。

電離作用は、物質を作っている原子の電子をはじき飛ばす作用であり、励起作用は電子を回っている軌道を、より外側に持ち上げることに相当する。どちらの作用でも、電子は放射線からエネルギーを受け取り、放射線はこの電子に与えたエネルギーに対応するエネルギーを少しずつ失っていく。この結果、電離作用では電離した電子(マイナスの電荷)と残った原子(プラスの電荷)が作られるため、物質の中に非常に微弱な電流が流れることになる。この電流やはじき飛ばされた電子を測定すれば放射線の量を知ることができる。また、励起作用では外側の軌道に持ち上げられた電子が元の軌道に戻るときに、蛍光(シンチレーション)を出す。この光を検出すれば放射線が通過したことがわかる。

以下では、放射線との反応が効率的に起こるような材質や構造をもつものを測定素子、測定素子の信号を計数または増幅して表示するもの全体を測定器と呼ぶことにする。

Q5　どんな放射線も測定できるのか?

放射線の種類にはアルファ線やガンマ線などがある。アルファ線やベータ線は薄

いプラスチックで遮蔽される。放射線測定器の中にある測定素子が露出していれば、放射線が入射して物質と何らかの反応が起こるが、残念ながら測定素子を保護するために金属製やプラスチック製の容器に入れられている。このため、図 26 に示すように容器を通過できるガンマ線のみが測定素子に入射できる（＊注 1）ので、通常の放射線の量を測定する測定器ではガンマ線のみが検出される（＊注 2）。

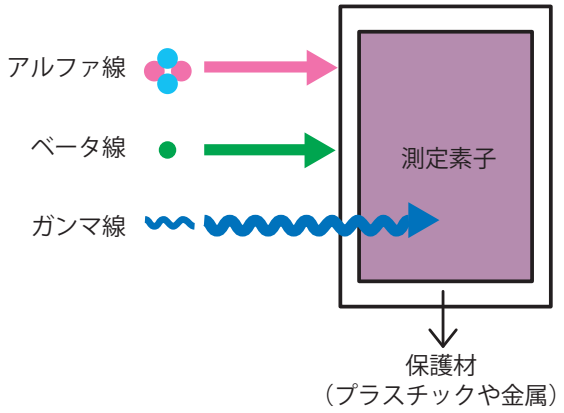


図26　放射線の種類と測定素子

放射線や放射性物質を測定するものには大きく分けて空間の放射線の量（1 時間あたりのマイクロシーベルト：μ Sv/h）や個人の線量（マイクロシーベルト：μ Sv）を測定するものと食品中の放射性物質の量（試料の重さあたりのベクレル：Bq/kg）を測定するものの 2 種類（＊注 3）が利用されている。今回は、この 2 種類を中心に放射線や放射性物質の測定機器について紹介する。図 27 に今回紹介する測定器の分類をまとめた。

＊注 1：エネルギーの高いベータ線が物質中を通過すると、エネルギーを失うときにブレーキがかかったように徐々に停止する。このとき、ガンマ線と同じような X 線（制動 X 線）が発生する。これにより、間接的にベータ線を測定できる測定器もある。

＊注 2：測定素子をごく薄いフィルムで保護することで、ベータ線やアルファ線を検出できる測定器もある。

＊注 3：大まかに言えば、この 2 種類の測定は、「外部被ばく」と「内部被ばく」に相当する。

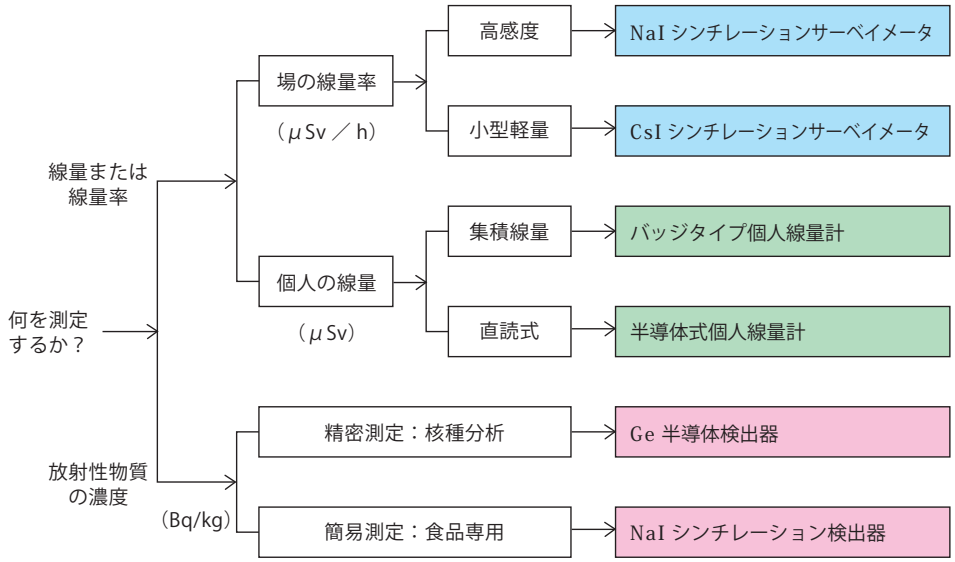


図 27　検出器の種類と用途の一覧

■放射線の量の測定の目的

放射線の量の測定には目的に応じて 2 種類ある。

一つは「放射線量がどの程度あるのか」、という場所の状況を知るためのサーベイメータによる測定である。これによると、生活や作業をしている場所の状況がわかるので、放射線量が高い場所に近づかない、遮蔽するなどの対策をとることができる。また、そのような地域に 1 年間居住するとどの程度の被ばくになるかを推定することもできる。

もう一つは実際に個人が「どの程度放射線をあびたのか」を知るための個人測定である。これを用いると、ある期間に被ばくした線量の結果を個人ごとに知ることができる。

場所の測定結果から、計算によって被ばく線量を推定することができる。しかし、線量率が一様ではなく分布があると、その区域内をどのように移動するか（したか）は不明なことが多く、被ばく量を正確に求めることは容易ではない。これに対し、個人線量計では個人ごとの被ばくした量がわかるものの、専門の測定機関に依頼することやあらかじめ測定素子を人数分準備しておくこと、結果が出た時点では被ばくしてしまっていることなどに注意しなければならない。

2. 空間線量の測定

線量測定には、個人の被ばくに着目した線量の測定と場所に着目した線量の測定の二つがあるが、ここでは後者について説明する。屋外や部屋の中など、ある場所での放射線量を**空間線量**という。地上では、太陽や銀河を起源とする**宇宙放射線**や地中、建物にある放射性物質から放出される放射線が空間中を飛び交っている。ある場所に着目して、そこへ飛んできた放射線が人体に与える影響の度合いを知るために、その点の空間線量を測定する。測定対象は主にガンマ線やX線であり、空間線量として**周辺線量当量**と呼ばれる量が使われている。単位は[Sv]シーベルトである。空間線量を測定する機器は、この周辺線量当量を測定できるように作られている。

据付型・可搬型には、ある特定の場所の空間線量を継続的にモニターする**モニタリングポスト**がある。シンチレーション線量計や電離箱線量計などが使用されていて、通常の環境レベルから事故時の高線量まで測定できるように設計されている。エリア放射線モニタは原子力発電所や放射線施設内の壁等に取り付けられて、作業者の安全確認に利用されている。

携帯型は、手に持って様々な場所の空間線量を測定するように作られており、これらは**サーベイメータ**と呼ばれている。一般に用いられているのは以下のものである。

NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータ

電離箱サーベイメータ

GM サーベイメータ

半導体サーベイメータ

なお、原子力発電所や加速器など中性子が発生する施設では中性子サーベイメータや中性子エリアモニタも使われている。

1. 測定の原理

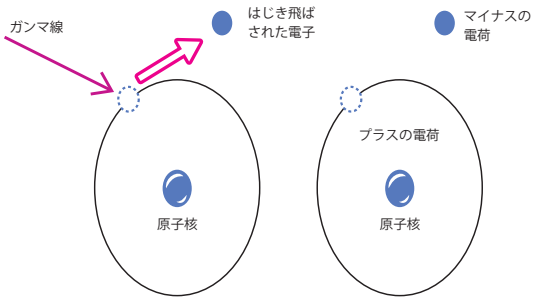
放射性セシウム（Cs-134 や Cs-137）などから放出されるガンマ線を直接測定することはできない。しかし、ガンマ線が物質を通過するときに起こる様々な現象を利用して間接的に放射線の量を測定する機器が開発されている。ここでは、まず放射線の量を測定する機器の基本動作をまとめる。

放射線の量を測定する機器には、ガンマ線が起こす反応である電離作用を利用するものと、励起作用を用いるものがある。

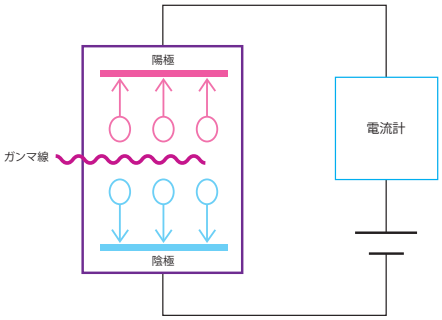
■電離作用とは

電離作用は図 28 に示すようにガンマ線が物質を通過するとき、物質を構成している原子核の周りを回っている電子をはじき飛ばすことである。この反応によって、同じ量の陰イオンと陽イオンが生じる。この現象を利用すると、図 29 に示す回路によって測定素子中に生じた陰イオンを陽極に、陽イオンを陰極に集めることで微少な電流が得られる。この電極間に高い電圧を加えると 1 本のガンマ線が通ったとき生じた電離が継続して起こることから、大きなパルス状の電流になる。このパルス状の電流を用いて、スピーカーから音を出したり、メータを振らせたりすることもできる。また、生じたパルスを計数回路で数えることにより放射線の量をデジタル表示することができる。この原理を用いたものが**ガイガーミュラー検出器**（＊注）以下、**GM管**と記す）である。このGM管の中には電離を効率よく起こさせる気体が封入されている。GM管は気体を用いた検出器であるから、測定素子中の気体の密度を大きくで

きないためガンマ線を捕まえる効率はそれほど大きくならない。また、生じたパルスの大きさはガンマ線のエネルギーに対応しないため、放射性物質の種類を知ることもできない。しかし、GM管はほかの測定素子より安くできるため、安価なサーベイメータではほとんどがGM管を用いている。一方、GM管は測定素子を大きくすることができるため、作業車両や作業者の汚染検査に多く用いられている。GM管の取り扱いや汚染検査に用いる例は次回の除染に関する項目で取り上げることとする。



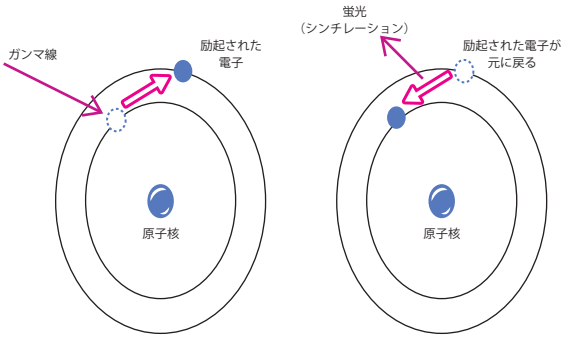
▲図 28　ガンマ線による電離作用



▲図 29　ガンマ線による電離電流の測定

■励起作用とは

励起作用は**ＮａＩ（ヨウ化ナトリウム）**または**ＣｓＩ（ヨウ化セシウム）**という固体を用いたものが多い。励起作用は図 30 のようにガンマ線が物質を通過するときに、そのエネルギーを軌道電子に与えることにより、軌道電子がよりエネルギー準位の高い状態に移ることである。原子核に近い電子は強く引きつけられていて安定であるが、励起作用は原子核に近いところにある電子を跳ね上げて、より高い棚の上に持ち上げることに相当する。高いところに上げられた電子は不安定で、下に落ちようとする。元の場所に戻るときに、持ち上げられた高さに相当するエネルギーを光として放出する。このような光を**シンチレーション（蛍光）**と呼び、測定素子をシンチレータと呼ぶ。この蛍光を電気回路により増幅することによって、入射した放射線の量を知ることができる。また、持ち上げられた電子の個数はガンマ線のエネルギーに相当するので、どんなエネルギーのガンマ線が入射したか、つまりどんな種類の放射性物質があるかも推定することができる。なお、このＮａＩを用いた測定器は後述する食品中の放射性物質濃度測定にも用いられている。



▲図 30　ガンマ線による励起作用

これらのGM管やシンチレータの測定素子を小型化して持ち運べるようにしたものは**サーベイメータ**と呼ばれている。市販されている測定器は放射線の量をデジタル表示するものが多い。

測定素子が大きければ、線源からの放射線をより多く捕まえることができる。逆に測定素子が小さければ、価格は安くできるが、放射線を捕らえる効率（計数効率）が小さくなる。このため、大きな測定素子に比べて計数効率が小さい安価な測定器では「ゆらぎ」のため指示値が安定しない。

しかし、密度が大きく、寸法の大きい素子は重くなるので、持ち運びを目的とするサーベイメータではそれほど大きくすることはできない。市販されているＮａＩを用いたサーベイメータでは直径、長さともに１インチ (2.54cm) となっている。

また、ガンマ線を捕らえるためには測定素子の中で効率的に吸収させることも重要である。測定素子の密度が大きくなれば、ガンマ線の計数効率は高くなる。ＮａＩ結晶やＣｓＩ結晶は密度が大きい固体のため、気体を用いるGM管よりガンマ線が透過しにくく、測定素子の中で捕らえることができるので、計数効率が高いサーベイメータを作ることができる。

＊注：一般に略してGM管と呼ぶことが多い。「ガイガー」も「ミュラー」もこのタイプの検出器を開発した研究者の名前である。ガイガーカウンターとも表記される。一部のメディアでは放射線測定器の総称として誤用していることもある。

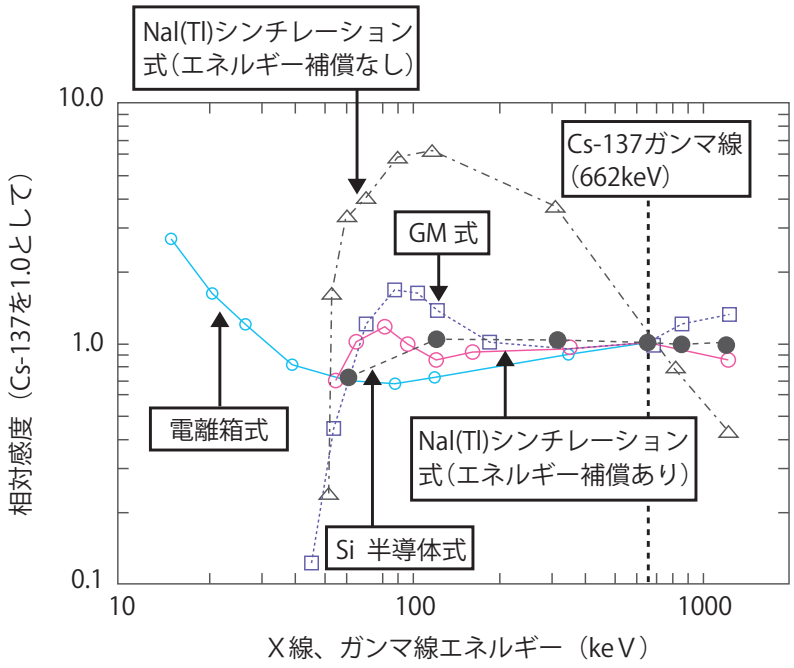
■表８　検出器の原理

電離を利用した検出器	
気体型	電離箱、比例計数管、GM 管
固体型	Si 半導体検出器、Ge 半導体検出器
励起を利用した検出器	
シンチレータ	NaI(Tl) ヨウ化ナトリウム、CsI(Tl) ヨウ化セシウム、ZnS(Ag) 硫化亜鉛
素子	TLD（熱ルミネセンス）、OSL（光刺激ルミネセンス）、RPL（蛍光ガラス）

2．測定器の特性

①エネルギー特性

サーベイメータの構造の違いにより、同じ周辺線量当量 [Sv] シーベルトでも放射線のエネルギーの違いにより示す値が異なる。これを**エネルギー特性**という。図 31 にそれぞれのサーベイメータでのエネルギー特性を示す。電離箱サーベイメータや**エネルギー補償型**の NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータのように、放射線のエネルギーが異なっても応答変化が少ないものの方が、より正確な線量を示すことができる。GM サーベイメータや、エネルギー補償がされていない NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータを使用する際には注意が必要である。



▲図 31　様々なサーベイメータのエネルギー特性

Cs-137 線源の測定値を 1.0 として、様々なエネルギーの X 線、ガンマ線を測定した時、実際の線量（周辺線量当量）と指示値の違いを比率で表す。1.0 より大きい場合は実際の線量より大きく表示し、逆に 1.0 より小さい場合は実際に線量よりも小さく表示していることを意味する。

②感度

一般的に感度の良い（低い線量でも測定できる）サーベイメータは NaI(Tl) シンチレーション式である。0.1 μ Sv/h 前後の線量を正確に測定することができる。次に GM 式、Si 半導体式、電離箱式となっている（図 32）。GM サーベイメータは、その構造や回路が比較的簡単なことから、様々なものが市販されている。寸法上の制約から 0.1 μ SV/h 以下のバックグラウンドを精度良く測定することはできないが、検出器部分を小さくすることにより、数 100mSv/h まで測定することができる。Si サーベイメータも、GM 式と同程度の感度を持っている。また最近ではセンサを複数個用いて感度を向上させた製品もある。電離箱サーベイメータは、線量率が高い場所の測定に適しており、数 Sv/h といった高線量域でも使用が可能である

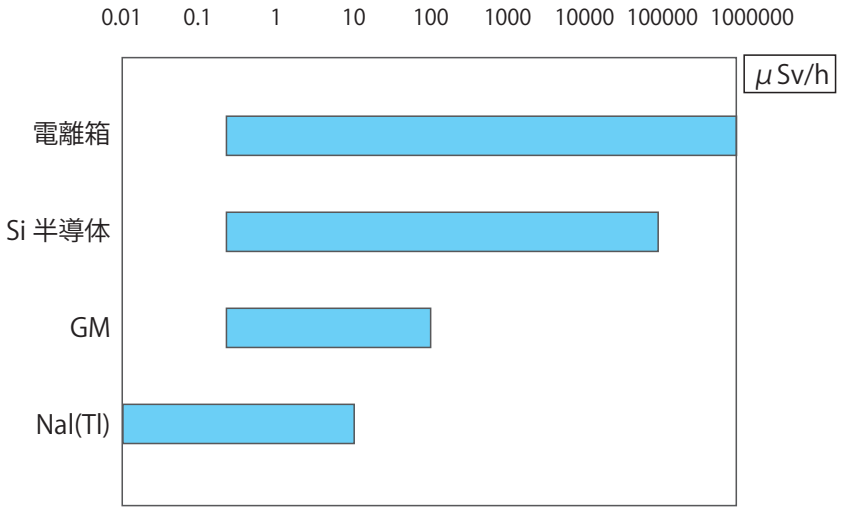


図 32　代表的なサーベイメータの使用可能な線量率範囲

③方向特性

サーベイメータの構造によるが、同じ線量の放射線でも入ってくる方向によって指示値が異なる場合がある。特に空間線量の場合、あらゆる方法から放射線が飛んでくることが多いので、種類の異なるサーベイメータで同じ場所を測定しても値が異なることが考えられる。この場合、大きい値が正しいとは限らないので注意が必要である。特に GM サーベイメータは細長い円筒形のものが多く、図 33 に示したように、側方入射(90 度方向) に比べて前方入射(0 度方向) は感度が 40~50% ほど低いので、校正されたときと同じ方向に、測定器を向けて測定することが必要である。

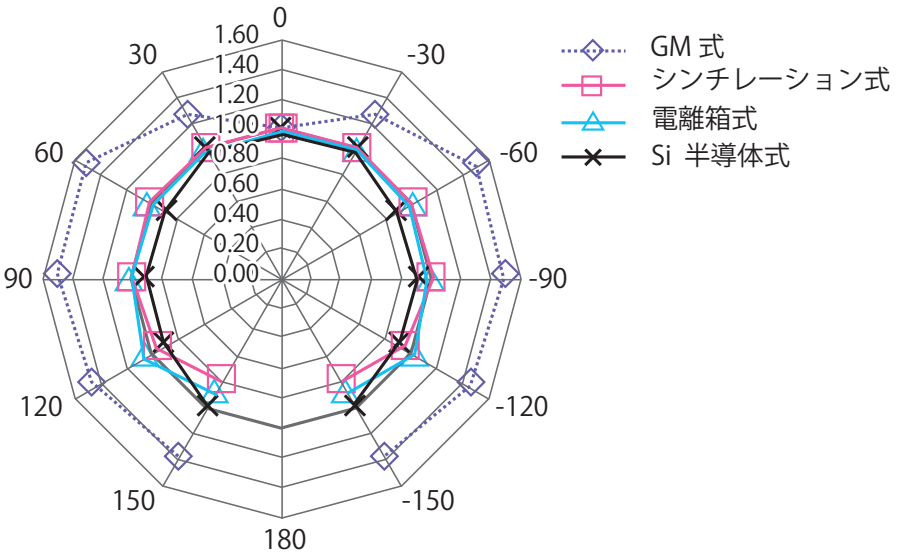


図 33　代表的なサーベイメータの方向特性

■ GM サーベイメータ

ベータ線を放出する放射性物質の多くはガンマ線も出している。そのため、古くから放射線測定にはベータ線もガンマ線も測定できる **GM サーベイメータ**（写真 1）が用いられてきた。**GM 管（ガイガーミュラー管）**を放射線検出器として使用しており、その名前の由来は二人の開発者の名前、ガイガーとミュラーである。

大気圧よりやや低い圧力のアルゴンガスに、わずかなハロゲンやアルコールを添加したガス封止型の検出器。ガス増幅と呼ばれる信号増幅作用を使い、ベータ線やガンマ線が入ると、その数に応じて大きなパルス電流が流れることから電子回路は簡単にできる。しかし、放射線のエネルギーはわからない。

ガンマ線測定に用いるものは厚手のガラスや金属でできており、ガンマ線がこの壁材にぶつかって発生する電子を測定するが、外からやってくるベータ線は止まってしまう。その結果、ベータ線の影響を受けずにガンマ線だけを測定することができる。

ベータ線測定用のものはベータ線が透過できる窓を持っている。この窓は人造のマイカでできていることが多く、鋭利なもので突き刺すと、大音響とともに瞬時で破れてしまう。一方、窓以外の材質は金属やガラスのため、透過力のあるガンマ線に

も感度がある。つまり、ベータ線用のサーベイメータはベータ線とガンマ線の双方を計測していることになる。Co-60 のようにベータ線が 1 本出る際、ガンマ線が 2 本出るような事例を除けば、大部分のベータ線放出核種はガンマ線よりベータ線をたくさん放出する。さらに、ベータ線の場合、入射した放射線に対する GM 管の検出効率は 90% を超えるが、ガンマ線の場合は 1% 以下である。したがって、表面汚染検査などのように放射線源に近い場所で計測を行う場合には、ベータ線を検出する方が高感度で検出できる。GM 管を収めた検出部は汚染防止のため、ラップフィルムが 1 重に巻かれている。この機種の場合、時定数の切り替えができる。時定数とは、測定位置における本来の計数率の約 63% を示すまでに必要な時間を意味する。これは一定時間、放射線計数値を積算して測定精度を高めるための機能で、一般的にはコンデンサの充放電特性を利用している。

▲写真 1　GM サーベイメータ

■ NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータ

ＮａＩ結晶をシンチレータとして利用したサーベイメータ(以下、ＮａＩシンチレーションサーベイメータ）は空間線量率の測定に最も多く用いられている。一般的なものでは直径 2.54cm、長さ 2.54cm のＮａＩ結晶が用いられており、計数効率が高く測定精度も高い。しかし、一般家庭で購入するには価格が高い(＊注)。ＮａＩシンチレーションサーベイメータ（写真 2）は、ＮａＩ結晶が入っているプローブ部分と計数回路や表示部等が入っている本体とに分かれていて、両者を信号ケーブルで接続している。このサーベイメータを用いた線量率測定の状況を写真 3 に示す。測定高さは通常地上1mとする。これは被ばく線量評価での人体の体幹部を代表点とするためである。

▲写真 2　NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータ

NaI(Tl) シンチレータは無色透明な重い結晶で、ガンマ線やX線が入射すると青白い光、シンチレーション光を発する。しかし、この光は大変弱く、そのままでは測定できない。そこで、光電子増倍管と呼ばれる一種の真空管を用いて、光を電子に変えた後、100万倍近く増幅する。こうしてシンチレーション光はパルス電流に変換され、線量率の計測に用いられる。

放射性核種が不明の場合や複数の放射性物質がある場合には指示値に大きな誤差を含むことになる。NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータには**エネルギー補償回路**が備わっており、この問題を電気的に解決している。1インチ型（直径25mm、長さ25mmの円筒形）NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータでは0.01μSV/h前後から測定が可能である。通常、自然の**バックグラウンド**のように低いレベルのガンマ線はNaI(Tl) シンチレーションサーベイメータでなければ高い精度で測定できない。

NaI(Tl) シンチレータではエネルギー分析が可能であり、**マルチチャンネルアナライザ**と呼ばれる回路を通すことでガンマ線のエネルギー分布がわかる。エネルギー分布がわかれば、放射性核種が特定できる。NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータにこの機能を持たせたものが**スペクトロサーベイメータ**である。通常の測定上限は10μSV/hだが、広帯域NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータでは0.01μSvから高線量率の100mSV/hまで測定が可能である。

▲写真3
NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータでの測定の様子
1mの高さで検出部は水平に保つこと

■その他

CsI(Tl) シンチレータはＣｓＩ結晶を用いた測定機器の例を写真4に示す。この例ではかなり小型軽量になっていて、使いやすく、比較的価格も安い（＊注）。

▲写真4　CsI (Tl) シンチレータ

プラスチックシンチレーションサーベイメータは、GM 管より検出器の有効面積が広く短時間に広い面積の測定にできるため、表面汚染測定で使われる。

ZnS(Ag) シンチレーションサーベイメータはアルファ線計測に使われる。アルファ線とベータ線の両方を計測できるものもあり表面汚染測定に使われる。

＊注：ここで紹介したＮａＩシンチレーションサーベイメータは約 54 万円、ＣｓＩを用いたものでは約 25 万円である1）。

ぷ

3．サーベイメータを用いて測定するときの注意

サーベイメータの取り扱いで注意する必要があるのは、ぶつけたりして衝撃を与えないことである。衝撃によってＮａＩ結晶などに亀裂が入ると、亀裂部分で光の伝達が妨害されるのでガンマ線の測定効率が低下し、精度のよい線量率測定ができなくなる。また、測定素子を入れたプローブ部分を放射性物質により汚染させると、見かけの自然計数率が増えるため、同様に線量率測定の精度が悪くなる。

次に、自然計数によって、**自然線量率（バックグランド線量率、略してＢＧ線量率と呼ぶ）**が生じることが挙げられる。原発事故以前の屋外での測定例では 0.04 μ Sv/h、屋内では 0.07 μ Sv/h 程度であった（現時点では仙台市内屋外では 0.08 ～ 0.10 μ Sv/h に上昇した。屋内ではコンクリートの壁に囲まれているので、コンクリートに含まれているカリウムー４０などからのガンマ線による影響があるため、周囲に全く放射性セシウムなどがなくてもこの程度の「自然計数値」は検出される。

ＮａＩ結晶はプローブ部分の先端に取り付けられているため、ガンマ線がプローブの後方から入射したときは、前方から入射したときに比べて検出効率は低下する（＊注 1）。これにより、放射線の入射方向（つまり、測定する方向）が違うと表示される測定値が異なる。測定機器の取扱説明書には測定器を水平に置いたときの各方向からのガンマ線（通常は、Cs-137 を用いる）の指示値の方向依存性が記載されていることが多い。地上で線量率を測定するときでは、原則として測定器を地面と平行において測定する。

安価な簡易的サーベイメータを利用しているときは、動作点検用の線源を購入したり、有償で校正を依頼したりすることは難しい。指示値が極端に小さい、ばらつきが大きい、全く変わらないなどの異常があるときは、メーカーまたは販売代理店に問い合わせるなどで対応する。特に安価な輸入品を入手した場合は、日本語の取扱説明書や方向依存性などの技術資料が添付されていないことが多く、また点検修理や交換部品の入手が困難なこともあるので、十分注意する（＊注 2）。

＊注 1: ＮａＩシンチレーションサーベイメータの例では、前方に比べて後方からの入射では、測定値が約 30% に低下するとされている。

＊注 2：（独）国民生活センターから平成 23 年 9 月 8 日に「比較的安価な放射線測定器の性能」に関する報道発表があった。これによると、インターネット上の説明では「正確に測定できる。」との記載があるものの、入手した測定器では「自然放射線レベルの測定ができない。」、「ばらつきが大きい。」、「返品できない。」などの課題があると報告されている。

4. 換算係数と有効桁数

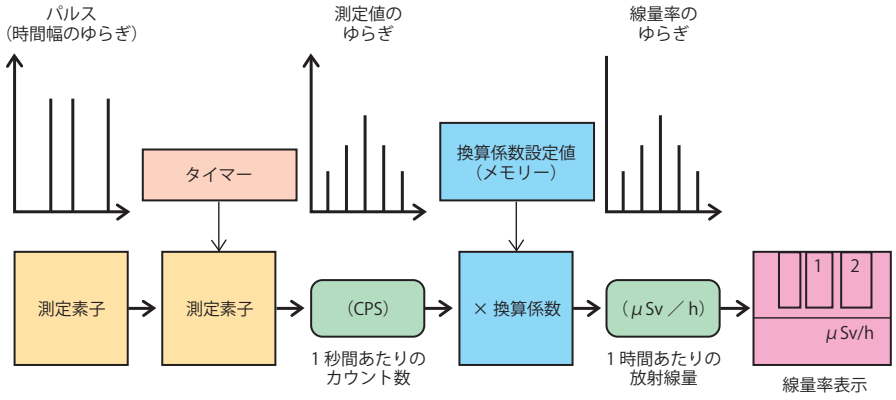
長さなどと違って、放射線は直接測定することができないことは前述の通りである。測定素子から得られるのは 1 秒間あたりの**パルスの計数値（Counts per Second：cps）**、またはある時点での**電流値 (A)** であって、これを空間線量率（μ Sv/h）に表示するには換算する必要がある。得られた計数値または電流値から換算係数を用いて、1 時間あたりの線量率を式 3 により算出する。

放射線の量（μ Sv/h）＝パルス数（cps）または電流値 (A) ×換算係数　（式 3）

図 34 に測定素子で得られたパルスから線量率を表示するまでの手順を示す。

換算係数はガンマ線のエネルギーによって異なるため、通常は Cs-137 を用いて値付けしていることが多い。現在の環境のように Cs-137 と Cs-134 が混ざり合っていても、Cs-134 と Cs-137 のガンマ線はほぼ同じエネルギーであるため、両者の換算係数にあまり差が無いため問題はない。

換算係数は（μ Sv/h）／（cps）または（μ Sv/h）／(A) で表示される。測定素子が小さくなると、同じ放射線の量であっても得られるパルス数や電流値が小さくなるため、換算係数が大きくなり、「ゆらぎ」によって指示値が不安定になりやすい。逆に、大きな素子であれば換算係数は小さくなり、安定な指示値が得られる。



▲図 34　パルスから線量率への換算

市販されている測定器はデジタル値を液晶表示していることが多く、測定器内部のメモリーには換算係数の桁数をいくらでも入れることができるので、表示される値の桁数も大きくできる。しかし、自然計数に「ゆらぎ」があることと同じように、測定素子から得られるパルス数や電流値にも「ゆらぎ」がある。よって、むやみに表示桁数を大きくしても無意味である。線量率の測定に用いるサーベイメータであれば、表示される桁数としては 2 桁で十分であり、それ以下の数値は表示されているとしても信頼できるものではない。

ただし、自治体などが公表している定点の線量率は、固定式の大型測定器を用いて長時間測定することで、3 桁の測定値を採用していることもある。

Q6　購入した測定器は指示値のばらつきが大きいが、どれが正しいのか？

一般にデジタル表示では具体的に数値が出るので、その値を信用する傾向がある。そのため「ゆらぎ」によってばらつきが大きいものは、どの値を信用すれば良いか分からないと思う方が多い。デジタル表示のときは、指示値を数回（5 回程度で良い）記録して平均することを勧める。

なお、指示値がアナログで表示されているときは、振れ幅の中央の値を採用する。

5．測定器の点検と校正

サーベイメータを用いた測定では、長期間にわたって定期的に線量率を測定する場合が多く、公共機関による線量率測定ではその結果が公表されている。このような場合、測定器が正確な値を示していることが重要になるため、定期的に指示値が正しいことを確認する必要がある。

一般に測定器は 1 年に 1 回または 2 年に 1 回程度の基準線源による校正を実施することが多い。この間に測定するときは、動作点検用の小さな放射線源が供給されているので、毎月1回程度、これを用いて測定の都度表示される値が安定していることを確認する

■校正作業とは

校正作業では正確に放射線の量が決められている場所に測定器を置いて、測定レンジごとに表示されている値との比率を求める。校正には基準となる強い放射線源が必要なので使用者が実施することは難しく、通常専門の校正機関に依頼する。ただし、校正するための費用＊注が必要であり、校正後に戻ってくるまでに 1 ヶ月ほどかかるため、その期間の測定には別な測定器が必要となる。

■動作点検とは

動作点検用の小線源は（社）日本アイソトープ協会により供給されている。旧型の場合はサーベイメータに専用の線源が付属している場合もある。いずれにしても、線源は厳重に保管し、所在不明や盗難などの無いように気をつけなくてはならない。

Q7　手元に線量率の測定器がないがどうしたらよいか？

自治体によっては、短期間ではあるが無償で校正済みの測定器を貸し出しているので、直接問い合わせて確認いただきたい。実際に測定機器を手に持って操作すれば、より理解が深まるので、研究機関や大学などが実施する講習会や見学会などを活用するとよい。

また、民間機関が有償で測定サービスや、測定機器のレンタルをしている。測定機器の種類や必要な費用は各サービス機関に問い合わせいただきたい。

Q8　購入した測定器が表示している線量率の値が正しいかを確認するにはどうしたらよいか？

必ずしも入手した測定器の校正や線源の入手は容易ではない。

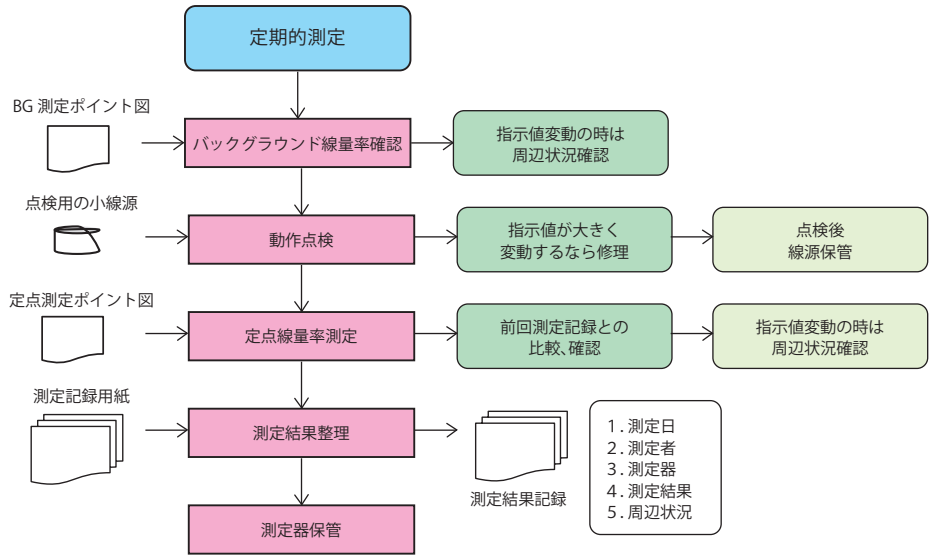
自治体などが校正された測定器を貸し出している場合は、その指示値と比較して

確認することを勧める。これが難しければ、あらかじめ定期的に測定されている場所と時間を問い合わせて、同時に測定してみることも可能であろう。

＊注:ＮａＩシンチレーションサーベイメータの例では校正費用は約 45,000 円である。

6. 測定の手順と注意

線量率の測定は毎月１回を目安として実施されることが多い。サーベイメータを用いて線量率を測定する手順は図 35 に示す通りである。臨時の測定でもこの手順に従って測定することで、正確な記録とする必要がある。



▲図 35　線量率の測定手順

主な手順は下記のように行う。

①バックグランド線量率の確認：できる限り同じ測定点とする

②線源による動作確認：終了後は線源を厳重に保管管理する。

③定点での線量率測定：指定高さ（通常は地上 1m）で指示値（線量率：μ Sv/h）を数回読み取り、その値を記録する。

④測定結果記録：線量率以外に測定日、測定者なども記録する。前回の測定結果と大きく異なっているときは、測定箇所の環境に変化がないかを確認し、その状況も記載する。特に、汚染を除去した場合や除染した土壌を搬入した場合などは、線量率が上下するので注意する。

臨時の測定などで、その場所の最大となる線量率を求めるときは方向依存性があることに注意し、各方向について測定して最大となる方向も記録することが望ましい。周辺環境に建物や樹木などがあるときは特に注意する。

周辺環境に変化がない場合、空間線量率にもほとんど変化がないはずである。Cs-134 の半減期が約 2 年であるから、長期間の変動を見れば、徐々に線量率が低下する傾向が見られる。

①測定器を選ぶ

約 0.1 μ Sv/h 以下の低い空間線量率を測定する場合。感度の良いシンチレーションサーベイメータを使用する。ただしエネルギー補償機能のないシンチレーションサーベイメータでは、精度の良い結果を得ることができないことがある。また一部のサーベイメータでは放射線が入ってくる方向によって値が異なるものがあるので、機種を選ぶ際には注意が必要である。

②正しく使用する

GM サーベイメータなどは、放射性物質による表面汚染と空間線量の両方が測定できるものがある。（単位として、[cpm] [μ Sv/h] の切り替えがあるものなど）。GM サーベイメータでは、ガンマ線に比べてベータ線に対する感度が高いので、通常、ガンマ線空間線量を測定する場合はベータ線が入らないように付属のキャップ等を装着する必要がある。正しい値を得るために、取扱説明書をよく読んだり、専門家から正しい使い方を聞いて測定を行うこと。

③レンジ、時定数の設定

サーベイメータには、**測定レンジ**や**時定数**などを設定するダイヤル類がある、低い線量を測定する場合は、メータが振り切れない程度に低いレンジで測定することを勧める。また時定数が長いほど低い線量でも安定して測定を行うことができるが、正しい値を示し始めるまでに時間がかかる。時定数の違いによって真の計数率に対する指示割合は変化する。このため、時定数によって待つ時間を変えることが必要であり、通常は測定したい場所にサーベイメータを置いてから、**時定数の 3 倍以上待ってから数字の読み取りを開始する**。

④測定する位置（高さなど）

地表付近に放射性物質が広がっている場合、放射線量は地表に近いほど高くなる傾向がある。決まった高さで測定しないと、他の空間線量の値と比較することができない。1m や 50cm など、あらかじめ測定する高さを決めておく必要がある。

⑤繰り返し測定し平均値をとる

空間線量を測定する場合、特に線量率が低い場合は測定値がばらつく。そのため繰り返し測定を行い、その平均値を得る必要がある。時定数が設定できる機器については、時定数の 3 倍の時間間隔で値を読み取る。時定数の切り替えができない機種では測定精度が一定になるように自動制御されているものがあり、線量率が高いところでは時定数が短く、低いところでは長くなるものがあるので注意が必要である。このような機器の場合は、10 秒や 30 秒ごとに決まった時間間隔で値を読み取る。繰り返し測定の回数は、少なくとも 5 回、できれば 10 回程度測定し、平均値を求める。

⑥校正定数

サーベイメータなどは、定期的に校正する必要がある。校正されたサーベイメータには校正証明書が添付されており、本体に校正値が表示されている。指示値に校正定数をかけることによって、正確な線量が得られる。

空間線量＝指示値×校正定数

■放射線測定器の性能

福島第一原子力発電所の事故以降、非常に様々な放射線測定器が市販されている。使われている測定器の種類も様々だが、安価なものはほとんどが GM 管を使用したものだ。全く同じ条件で測定しても、使用する測定器によって値がばらついて、どれが正しいのか問題になるが、これはその測定器がどれ位の精度を持っているかにかかっている。一般的に安価なものは測定器は小さくて感度が低いので、低い空間線量を測る時は長時間測定しないと、測定値は上がったり下がったり大きく変動して正確な値がわからない。また、空間線量率として [μ Sv/h] の値を示していても GM 式や NaI(Tl) シンチレーション式のうちエネルギー補償が付いていないものは大きく感度が変わる。一般の測定器は Cs-137 の 662keV のガンマ線で校正して、検出したカウント数 [cpm] を線量 [μ Sv/h] に換算しているが、ガンマ線のエネルギーが変わると、エネルギー特性の悪い測定器は過大評価や過小評価を与えるので注意が必要である。たとえ、測定対象の放射性核種が Cs-137 だとしても、環境中ではそのガンマ線が地面や建物に衝突し錯乱されてエネルギーが低くなったものが含まれるので、一般に GM 式やエネルギー補償のないシンチレーション式のサーベイメータは過大評価になる。

また、測定器の管理と校正も重要で、それらが正しく行われていない測定器は、測定器の精度は分からないといっていい。

7. 個人線量計による測定

■測定の原理

サーベイメータが空間線量率（μ Sv/h）を測定するのに対し、個人線量計はある期間に被ばくした合計線量（μ Sv または mSv）を測定するものである。

個人線量計には測定素子としてガラスを用いたものや酸化アルミニウムを用いたバッジタイプのものと、測定素子として半導体を用いたペンタイプのものがある。

バッジタイプのものは、放射線によって測定素子の内部に生じた蓄積エネルギーを紫外線やレーザーを照射することで蛍光として捕らえ、線量を測定する方法が用いられている。

ペンタイプのように測定素子として半導体を用いると、ガンマ線によって検出器内部に、はじき出された電子（陰イオンに相当する）とそれによってできる空隙である正孔（陽イオンに相当する）が生じる。生成した電子は測定器の中で自由に動けるようになり、電圧をかけておけば、前述のGM管と同じように陽極に電子を、陰極には正孔を集めることができ、電流が流れる。ペンタイプの線量計には半導体としてシリコンを用いたものがある。このような個人線量計は、被ばく線量が常時表示されているため、被ばく線量を直読できるものが多く、数時間から数日の比較的短期間の測定に用いられる。

▲写真 5　個人線量計

■個人線量計の例

通常バッジタイプの個人線量計は専門会社により測定サービスが供給されている。サービスを申し込むと定期的に線量計が送られてくるので、着用期間後に送り返す。その後、個人ごとに被ばく線量を測定した報告書が手元に届く。このバッジタイプによる測定は比較的安価＊注で、取り扱いも容易であり、多数の対象者を一括して管理することができる。また、長期間装着しても線量の算出値が安定していることや、小型軽量で邪魔にならないこと、電源が不要なことなどの特徴がある。なお、このバッジタイプの線量計を用いて、所定場所の長期間の集積線量を測定することも可能である。このように、バッジタイプの線量計は多くの特徴があるが、送り返す期間や測定などに時間を要するため、測定結果がわかるまで 2 から 3 週間かかる。

半導体検出器を用いたペンタイプの個人線量計の例を写真 5 に示す。バッジタイプの個人線量計と異なって、その時刻における被ばく線量を直読できるという利点があり、数時間程度の作業での被ばく管理に用いることが多い。ただし、この個人線量計は電池式なので、数ヶ月の長期間は連続着用できない。

＊注：継続して利用する場合、1 回あたり約 1000 円である。

■測定の注意

個人線量計を用いた線量測定では、個人ごとに配布されるので、複数で線量計を共有したり、他の人のものを着用したりすると個人ごとの測定や集計ができなくなる。また、作業中または着用期間中は原則として常に着用しなければならない。

個人線量計もサーベイメータと同様に放射性物質によって汚染させてはならない。汚染することによって、被ばく線量が大きく評価されるため、正確な線量測定や集計ができなくなる。

8．モニタリングポスト（連続環境ガンマ線測定器）

モニタリングポストとは据え付けた場所の空間線量を 24 時間連続的に測定する装置のことをいう。原子力発電所などの施設周辺に設置して、施設の異常により放射性物質が拡散していないかどうかチェックするために用いられる据置型のものや、発電所事故などの緊急時において、施設外に放出された放射性物質による影響の評価のために設置される可搬型のモニタリングポストがある。モニタリングポストは、平常時の環境放射線レベル（0.05 μ Sv/h）から、事故時における線量（100 μ Sv/h

以上) まで幅広い線量率を測定する必要がある。そのため、低線量率の検出器としてエネルギー補償型の NaI(Tl) シンチレータを、また高線量率用として加圧したガスを封入した大容量の電離箱の 2 種類の検出器を 1 セットとして用いている。(写真 6) 現在では、低線量率の測定用として半導体検出器が用いられているものもある。この装置は、半導体検出器を 8 個使用し平常時の環境放射線レベル (0.05 μ Sv/h) の線量率を測定することができる。またこのタイプは、太陽電池と蓄電池を電源に用いており、外部からの電源供給が不要で、事故による停電時にも使用できるようになっているものもある。

▲写真 6　公園に設置されているモニタリングポスト (郡山市)

モニタリングポストには [μ Sv/h] を示すものと [μ Gy/h] を示すものがある。モニタリングポストの国内規格である JIS Z 4325「環境γ線連続モニタ」では、表示部の単位は [μ Sv/h , μ Gy/h] といった空気吸収線量または空気カーマとなっている。これは空間線量を表す単位の一つだが、サーベイメータが示す [μ Sv/h] には単純に単位を読みかえることはできない。[μ Sv/h] から [μ Gy/h] への換算は、その場のガンマ線のエネルギーによって値が変わってくる。例えば Cs-137 線源から放出されるガンマ線 (662 keV) に対しては約 1.2 を、またそれよりエネルギーが低い 100keV のガンマ線の場合は、約 1.7 を [μ Gy/h] の値にかけることによって [μ Sv/h] を求めることができる。そのため、入ってくる放射線のエネルギーがどのようなものなのか分からないと正確な換算を行うことができない。ヒトの被ばく量 [Sv] に直接換算することはできないが、線量 [Sv] の変化を見るには適している。

またモニタリングポストは、事故時の放射性プルームなどによる空間線量を測定することが重要であることから、側面から上方向に対して感度があるように設計されている。写真 6 を見てもわかるように、検出部分は装置の上に、測定回路や記録装置類は検出器の下の建物に設置されている。放射性物質が拡散し地面などに降り積もった後では、放射線は主に地面からやってくることになるため、モニタリングポストでは正確に空間線量を測定することが難しい場合がある。

3. 表面汚染の測定方法

1. 対象とする放射線

a) ベータ線ガンマ線：放射性同位元素を使用する研究施設や原子力発電所

b) ベータ線（ガンマ線は通過）：GM サーベイメータ

c) アルファ線：研究施設や再処理工場

表面汚染の測定の対象となる放射線は、場所や施設によって異なる。ベータ線やガンマ線を出す放射性同位元素を使用する研究施設や原子力発電所では、ベータ線やガンマ線を測定する。ただ、表面汚染の測定に使用する GM サーベイメータではガンマ線の大半は検知されずに測定器を通過してしまうのに対し、ベータ線は測定器に到達すればほぼ全て検知できるので、主にベータ線を測定対象としている。アルファ線を出す放射性物質を使用する研究施設や再処理工場では、アルファ線も測定している。

2. 利用する測定器

表面汚染の測定には測りたいものに測定器をかざして汚染を直接測定する直接測定法と、測りたいものの表面を線用のろ紙などで拭き取り、そのろ紙を測定する間接測定法がある。間接測定法はスミヤ法とも呼ばれている。測定物の形状が複雑な場合、直接測定法では測定できない場所が生じる。そのような場所ではろ紙で拭き取るなどして、間接測定法により汚染を評価する。

(1) 直接測定法：測りたいものに測定器をかざす

a) GM サーベイメータ

b) プラスチックシンチレーションサーベイメータ

c) Si 半導体サーベイメータ

直接測定法の場合は、検出部が大きいサーベイメータを使う。

(2) 間接測定法：測定したいものの表面をろ紙などで拭き取りそのろ紙を測定

・GM サーベイメータ

間接測定法の場合は、ろ紙の放射能を自動的に測定する装置が市販され広く用いられている。GM サーベイメータでの測定も可能である。

3. 測定の方法

GM サーベイメータによる直接法を例にとり説明する。

(1) 汚染の有無だけを知りたい場合

測定面を対象物になるべく近づけ、ゆっくりとなぞるように測定器を平行に動かして、指示値の変化を読み取る。

＜注意＞

①指示値は不安定なので指示計の動きを見てその平均を読み取る

②バックグラウンドの値をあらかじめ記録しておく

・測定器を対象物にかざして動かしていると、ときどき指示計が大きく振れる時は、その場所で測定器を動かさないで、指示値がさらに大きくなるかを見ること

＜評価＞

・バックグラウンドのゆらぎを超えて大きな指示値を示したら、その場所が汚染し

ているかもしれない

・特定の場所に近づけると指示値が大きくなり、離すと小さくなる場合も汚染の疑いがある

・指示値が大きくなっても、その場所で測定器を動かさずに待つうちに指示値がさがるようであるならば、汚染ではない

・指示計の指針は揺れるが平均値はバックグラウンドと変わらない場合も汚染ではない

(2) 汚染の程度を知りたい場合

a) 測定器：機器効率を校正した測定器を用いる

b) 測定方法：

・(1) と同じ要領だが、校正時と同じ配置で測定する

・機器効率は測定対象からの距離に大きく依存するので同じ配置であることが重要

・検出器を移動させず、時定数は長くして、時定数の 3 倍以上待つ

・測定器が十分応答してから指示値の平均値を読み取る

c) 線源効率を知っておくこと --- 対象物の表面汚染について、測定器を置いた側の表面から飛び出してくる放射線の放射率を放射能で割った値のこと

＜ JIS　Z　4504 ＞によると、表面汚染の線源効率が明らかでない場合、

・最大エネルギー 400keV 以上のベータ線に対しては 0.5

・アルファ線及び最大エネルギーが 150kekV から 400keV のベータ線に対しては 0.25 の線源効率の値が推奨されている。

表面汚染は次の式に従い、読み取った指示値からバックグラウンド計数率を引いて求めた正味の計数率を、測定器の機器効率、測定器の有効窓面積、対象物の線源効率で割ることによって求めることができる。

$$A_S = \frac{n - n_B}{\varepsilon_i \times W \times \varepsilon_S}$$

ただし、

A_S：放射能面密度 [Bq / cm2]

n：総計数率 [s-1] ([cpm] または [min-1] を単位として計数した場合は、60 で割って毎秒あたりの計数にする)

n_B：バックグラウンド計数率 [s-1] ([cpm] または [min-1] を単位として計数した場合は、60 で割って毎秒あたりの計数にする)

ε_i：測定器の機器効率

W ：測定器の有効窓面積 [cm2]

ε_S：表面汚染の線源効率

(3) 表面汚染の計算の例

条件

・バックグラウンドの計数率 (n_B) : 100cpm
・汚染測定の計数率　(n) :　1,100cpm
・測定器の機器効率　(ε_i) : 0.4
・表面汚染の線源効率 (ε_S) : 0.5
・測定器の有効窓面積 (W) :　20cm^2

計算

①正味の計数率＝1,000cpm
② 60 で割って毎秒の計数率にすると 17 カウント毎秒 [s-1] となる
③機器効率で割って測定対象からの粒子放出率を求めると、毎秒 40 個 [s-1] が放出されていることがわかる
④線源効率で割って測定対象の放射能に換算すると 80Bq が得られる
⑤検出面積と同じ面積からの放射線を検出しているとして、有効窓面積で割って放射能面密度 (As) は 4Bq/cm^2 となる

$$A_S = \frac{n - n_B}{\varepsilon_i \times W \times \varepsilon_S} = \frac{\frac{1100\text{-}100}{60}}{0.4 \times 20 \times 0.5} = 4$$

4. 測定の際の注意

測定器の取り扱いで注意することがあるので、実際に測定する際に参考にすること。

(1) 測定対象と測定器の距離

表面汚染に用いる測定器の機器効率は、面状の線源から 5mm 離した場所に、測定器と平行に置いた条件によって求めている。線源と測定器の間隔を広げていくと、線源から出た放射線が測定器の入射窓に到達する割合が減っていき、機器効率は小さくなる。実際、線源と測定器の間隔を 5mm から 10mm まで大きくすると、機器効率は 3 分の 2 程度まで小さくなる。そのため、測定対象物が平面でない等の理由で測定器を近づけられない場合は、機器効率が小さくなることを考慮して汚染を評価しなければならない。

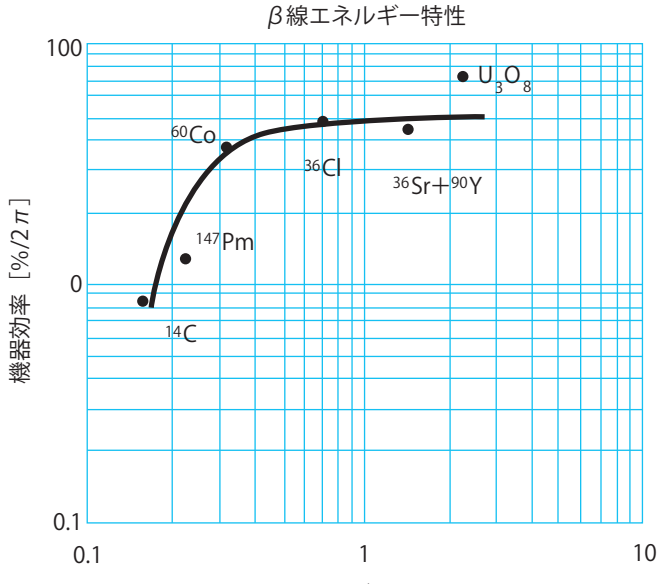
(2) ベータ線エネルギーへの配慮

放射性汚染の原因となる放射性物質が異なると、放射線のエネルギーも異なる。GM サーベイメータでは放射線を検出するガスを封じるために入射窓が設けられているので、弱いエネルギーのベータ線は通過することができない。シンチレーションサーベイメータや半導体サーベイメータでは入射窓は薄いが、GM サーベイメータに比べて得られる信号が小さいため、やはり弱いエネルギーのベータ線を計数することができない。そのため、測定しようとするベータ線のエネルギーが小さいと、機器効率は小さくなってしまう。表面汚染測定のための測定器は通常 Tl-204(最大エネルギー 764keV) や Cl-36(同 709keV) から出るベータ線を用いて校正されている。Cs-134(同 658keV) や Cs-137 (同 514keV) のように発生するベータ線のエネルギーがあまり変

わらない場合は、機器効率もあまり変わらないが、C-14（同 156keV）や Pm-147（プロメチウム -147 同 224keV）のようにベータ線のエネルギーが小さい場合には、機器効率が小さくなることを考慮する必要がある。H-3（同 18.6keV）のようにベータ線のエネルギーがとても低い場合は、窓なし比例計数管のような線用の測定器を用いなければ測定できない。

▼図 36　GM サーベイメータの機器効率とベータ線エネルギーとの関係

天然ウランを用いて校正する場合、アルファ線を止めるために線源の前面に厚さ 0.1mm のアルミ板を装着しているため、低エネルギーのベータ線の割合が他の線源の場合より少ない。そこで、機器効率は高めに評価される。また、Sr-90 + Y-90 のエネルギーは Sr-90 からのベータ線と、それに引き続いて放出される Y-90 からのベータ線の、最大エネルギーの平均値としている。



(3) 測定対象物の線源効率

汚染物の表面に凹凸があると、凹の部分に入った放射性物質からの放射線の一部は遮蔽されてしまう。また、液体に溶けた放射性物質が、布のように浸み込みやすい材質に付着すると、内部にしみこむことにより、同様に放射線の一部は遮蔽されてしまう。エネルギーが低いベータ線の方が遮蔽される割合が多くなる。このためエネルギーが低い放射性物質による汚染を測定する場合や、汚染物の材質が布などのように浸透性である場合は、線源効率は 0.5 より小さくなることに注意する必要がある。

木材のチップなどを袋に詰めた物などは、上部しか測定器を近づけられないので汚染を見逃す恐れがある。その場合には袋から出して並べて測定するようにする。内部の汚染が心配な場合は放射能濃度の測定を行う。セメント粉や焼却灰のような粉体の汚染を、表面汚染測定で検査するのは適切ではない。

(4) 測定器を移動させる速さ

表面汚染測定用の測定器には測定の時定数が選べるようになっているものもある。時定数を 3 秒のように短く設定すると、指示値はばらつくが、汚染があると速く応答して指示値が上昇する。反対に 30 秒のように長く設定すると、指示値はあまりばらつかなくなるが、応答は遅くなる。測定物が検出器よりも大きい場合、測定対象物をなぞるように測定器を動かす。その時時定数は短くして、測定器を移動は毎秒数 cm 以下にする。移動が速いと汚染を見逃す恐れがある。

4. 放射能の濃度の測定方法

1. 個体の濃度を測る

ガンマ線を放出する放射性核種は、Ge 半導体検出器や NaI(Tl) シンチレーション検出器を用いて測定することができる。

金属やコンクリート、木材などは、試料をそのまま検出器に載せる。少し離して置くために測定台を用いることもある。食品や草、あるいは土壌などでは、決まった形状にするため、標準的なプラスチック製などの容器に、決まった高さに詰めて測定する。

Ge 半導体検出器や NaI(Tl) シンチレーション検出器では、ガンマ線エネルギースペクトルが得られる。ガンマ線のピークが現れる場所とエネルギーの関係をあらかじめ求めておけば、試料を測定した時にガンマ線のエネルギーが分かり、資料に含まれる核種が何であるかを知ることができる。特に Ge 半導体検出器では分解能が非常に高いため、エネルギーの近いガンマ線を放出する放射性核種が混じっている場合でも、精度良く分離測定することができる。

測定器の検出効率を求めるには、試料と同じ形状と材質のものに、既知の放射能を持つ放射性物質を均一に混ぜた標準線源を用意し、試料と同じ場所に置いて測定する写真）このとき、試料に対して密度と平均的な原子番号が近い物質であればガンマ線の試料が内部で吸収されてしまう（自己吸収）確率は大きく変化することはないため、必ずしも同じ材質である必要はない。少しの密度の違いは簡単な計算によって補正することもできる。測定試料の放射性核種と標準線源の核種が同じであれば最も正確な測定ができるが、異なっていてもかまわない。いくつかの放射性核種を混ぜた、広い範囲にわたって様々なエネルギーのガンマ線を出す標準線源を測定し、検出効率をエネルギーに関する関数として求めておけば、どのようなガンマ線放出核種でも測定することができる。今日では、ガンマ線と物質の相互作用の様子は詳細に分かっているため、その現象をコンピュータのプログラム上で正確に再現することによって、計算によっても十分精度良く検出効率を求めることができる。

以上のような方法によって、未知の試料に対し、含まれる放射性核種の種類を同定し（定性分析）、放射能を知る（定量分析）ことができる。

Sr-90 のようにベータ線しか放出しない放射性核種、あるいは Pu-239（プルトニウム -239）のようにアルファ線以外では高感度の測定ができない放射性核種の測定は、ガンマ線のように簡単ではない。ベータ線やアルファ線の透過力は非常に小さいため、測定試料の外にこれらの放射線がほとんど出てこないためである。そのため、酸などで試料を溶かした後、目的とする放射性核種を含む元素を化学的に抽出し、最後に水分を蒸発させて極めて薄い試料に調整する。こうすれば、放射線はほとんど自己吸収されることなく外部に出てくる。ベータ線放出核種はガスフロー型比例計数管、プラスチックシンチレーション検出器などで、アルファ線放出核種は ZnS(Ag) シンチレーション検出器、ガスフロー型比例計数管、あるいは表面障壁型 Si 半導体検出器、イオン注入型 Si 半導体検出器などによって高い効率で測定できる。写真）特に Si 半導体検出器ではアルファ線の精密なエネルギー測定ができるため、精度の高い定性、定量分析が可能である。このような測定では放射能の値を求める際に、

放射線の検出効率だけでなく、化学的に抽出する際の収率も考慮しなければならない。

自然界には極めて長い半減期を有するTh-232、K-40などがあり，特に岩石や土壌、コンクリートなどにたくさん含まれている。Th-232がアルファ壊変、ベータ壊変を繰り返してできるTl-208は、2.62MeVという高いエネルギーのガンマ線を放出し、K-40は1.46MeVのガンマ線を放出する。この他にも自然界にあるたくさんの放射性核種からは様々なエネルギーのガンマ線が放出される。そのため検出器に何も放射性物質を置かなくても、ある程度の時間計数すると、バックグラウンドエネルギースペクトルが現れる。試料の放射能が弱いと、測定したいガンマ線のスペクトルがバックグラウンドに埋もれてしまうことになり、測定できなくなってしまう。このため、検出器は厚い遮蔽対で囲んでいる。

2．液体の濃度を測る

ガンマ線を放出する放射性核種の場合、最も簡便な方法は試料液体を直接容器に入れてGe半導体検出器やNaI(Tl)シンチレーション検出器で測ることである。容器は円柱形のものも使えるが、濃度の低いものを短時間で測定することが必要な場合はマリネリ型と呼ばれる、底部に凹みを持った円柱形容器を用いる。検出器を凹みの中に差し込むことによって、検出器が測定試料で囲まれ、高い検出効率が得られる。検出効率の求め方などは固体試料と同様である。

放射能濃度が低く直接測定が困難な場合は、煮詰めて水分を蒸発させて濃度を高めて測定することができる。ただしヨウ素のように煮詰めると気化してしまう元素の場合は、イオン交換樹脂などに吸着させ、それを測定することもある。

水分をすべて蒸発させた残渣が非常に少ない場合は、乾固した試料を用いてアルファ線、ベータ線測定をすることができる。電着などによって試料を作ることもある。残渣が多く自己吸着が顕著な場合は、目的とする放射性核種を含む元素を化学的に抽出することが必要になる。使用する測定器は固体試料を溶解した場合と同じである。H-3やC-14などで比較的濃度が高い場合は試料溶液の一部をそのままシンチレータに溶かし込んで液体シンチレーションカウンタを用いて測定することができる。検出感度が不足する場合は濃縮が必要である。水中のH-3は、普通の水素と同様に水分子を形成しているため通常の方法では濃縮できない。この場合は同位体による反応の差を利用し、電気分解を繰り返すなどの方法で濃縮することになる。

3. 空気中の濃度を測る

ほとんどの放射性核種は、エアロゾルと呼ばれる形で空気中に存在している。これは放射性核種が空気中の極めて小さい固体または液体の粒子に付着して漂っているものである。このようなエアロゾルは、非常に目の細かいフィルタを用いて大量の空気をこし取ることによって採取する。揮発性の高いヨウ素では、ガストして存在することが多く、通常のフィルタでは捕集能力が落ちてしまう。そのため活性炭フィルタを用いて採取する。フィルタに付着した放射性物質は、固体の濃度を測定する場合と同様の測定器を用いて測定する。測定して得られた放射能の値を、採取した空気の体積で割れば放射能濃度 [Bq / m^3] が得られる。

水の形で存在する H-3、二酸化炭素の形の C-14 はフィルタで捕集することができない。H-3 では、ドライアイスなどで冷却した捕集器（コールドトラップ）に空気を通すことによって水を凝縮して集める。二酸化炭素ではモノエタノールアミン水溶液に空気を通して捕集する。測定はともに液体シンチレーションカウンタが用いられる。

Ar-41 や Kr-85 など希ガス、窒素や酸素に含まれる N-13 や O-15 の場合は、気体をそのまま容器に導き、NaI(Tl) シンチレーション検出器やプラスチックシンチレーション検出器でガンマ線を測定したり(後者の場合はベータ線も測定可能)、電離箱によってベータ線やガンマ線による電離電流を測定したりする。

このようにして測定された空気中濃度は、そこで呼吸する人の内部被ばくの評価に用いられる。吸入した放射性核種は、その元素としての性質から、肺にとどまったり血液を介して体内に沈着する。このような代謝と、放射性核種の半減期を考慮して、1Bq の放射性核種を吸入摂取した場合の内部被ばく（預託実効線量）の値 (線量換算計数) が計算によって求められる。線量換算計数 K [mSv/Bq] に、測定された空気中濃度 C [Bq/m3]、滞在時間 t [h]、呼吸率 b(成人で約 1.2m3/ h) を乗じることによって、内部被ばく（預託実効線量）E [mSv] を見積ることができる。

4．サーベイメータを用いて簡単に放射能を測る

原子力発電所事故などの緊急時には正確さは劣るが、NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータを用いて、固体や液体に含まれるガンマ線を放出する放射性核種の放射能を簡単に測ることができる。この場合、サーベイメータでは放射性核種分析ができないので、含まれている放射性核種が分かっている必要がある。しかし事故から数日以降では I-131 が環境に影響を与える主な放射性核種であって、数十日以降では Cs-134 と Cs-137 が主な放射性核種である。同じ放射能であれば、ヨウ素よりもセシウムの方がサーベイメータの計数率（毎秒の計数率 cps [counts per second] ）あるいは線量率 [μ Sv/h] は大きくなるので、事故から数十日以内であれば、放射能 [Bq] とサーベイメータの指示値の関係を I-131 に対して求めておけば過大評価(安全側）である。同様に Cs-137 より Cs-134 の方がサーベイメータの指示値は大きくなるので、数十日以降であれば Cs-137 に対して関係を求めておくことができる。

いろいろな容器に詰めた牛乳、水、野菜や肉類などに関し、I-131 あるいは Cs-137 に対するサーベイメータの指示値が校正できていれば、正確さには劣るもののこれらの放射能濃度を簡単に知ることができるので、緊急時には便利である。ただし、サーベイメータを用いた測定は一般に感度が低いため、緊急時以外の測定には不向きである。

5. 食品放射能の測定

食品中の放射性物質濃度を一般の施設や家庭で測定することは難しい。ここでは、専門の測定機関に測定を依頼することを想定して進める。

1. 放射性物質測定試料の準備

食品などに含まれる放射性物質の量を測定依頼するためには、まず測定試料を準備して、測定依頼先に直接持参するか宅配便などで送付することが多い。試料を送るときは、試料を入れる容器（一般的にはプラスチック容器が多い）や梱包方法などが指定されていることもあり、必要な試料の重さも測定機関によって異なるため、あらかじめ確認しておく必要がある。

準備した試料に濃度分布があると、正確な測定結果が得られないので、試料は粉末にするか細かく切断してよく混ぜ合わせて一様な試料にしなければならない。

各試料の例を下記にまとめる。

①飲料水や牛乳

水道水などの飲料水や牛乳はほぼ一様なのでそのまま測定試料とする。

②食品

玄米や精米したものも一様になっているのでそのまま測定試料とする。

魚や肉、果物、葉物野菜などは洗浄後、可食部を分離して、フードプロセッサーなどにより細かく砕いて試料とする。複数の試料を準備するときは、使用したフードプロセッサーを十分洗浄して、試料が混じり合わないようにすることが重要である。ただし、このような試料調製は測定機関が実施しており、依頼者は洗浄のみで済むことが多い。P62 に野菜を対象とした食品の準備の様子を示す。一部の自治体では、このような方法により給食に用いられた食材の放射性物質濃度を測定し、公表している。

また、茶葉やキノコなどのように乾燥した試料のとき、濃度の測定単位が Bq/kg であるため、乾燥の度合いによって濃度の値が変動する。よって、乾燥条件を同じようにして含水率をそろえるか、別途測定した水分量で補正することが重要になる。

③土壌

原則としてそのまま測定試料とする。ただし、汚泥や田畑のような泥状の含水率が高い場合は水を分離するか乾燥させる。

一般に土壌では、ある地点を中心に 4 方向の地点から合計 5 試料を採取し、混合して一つの試料とすることが多い。これにより、広い場所であっても代表性がある試料を得ることができる。

2. 食品用放射能測定装置

(1) 食品用放射能測定装装置

放射性物質の濃度を測定するには、測定試料から出てくる放射線のみを検出する必要がある。周辺からのガンマ線を遮蔽するため、検出器や測定試料の周りは鉛などで覆っていることが多い。

食品の放射性物質濃度測定には、**Ge半導体検出器**（P63　写真 13・14）と**NaIシンチレーション検出器**（P63　写真 11・12）を用いたものの 2 種類が用いられている。それぞれの特徴を表 9 にまとめる。

▼表 9 食品中放射性物質濃度測定器の比較

検出器の種類	長所	短所
Ge 半導体検出器	①ガンマ線のエネルギーの分解能が高いので放射性物質の種類ごとに定量ができる。 ②微量分析が可能である。 ③様々な種類の試料の測定が可能である。	①測定素子を常に冷却するための液体窒素を定期的に補充する必要がある。 ②専用の電源や解析するためのソフトウエアが必要で維持管理が面倒である。定量するためには専門的な技術が必要になる。 ③価格が高く試料交換装置などを自動化されたものでは 2000 万円を超える。 ④周辺からのガンマ線の影響を防ぐため大きな遮蔽体が必要で全体の重量も大きく、設置場所の床面に強度が必要になる。
NaIシンチレーション検出器	①食品分析専用の測定器に用いられている。 ②比較的価格が安く 150 万程度から市販されている。 ③取り扱いが簡単である。	①一般に測定対象は水、土壌、食品の 3 種類に設定されており、指定対象以外の試料の分析には対応していない。 ②定量できる放射性物質の種類は放射性ヨウ素と放射性セシウムのみであることが多い。 ③鉛を用いた遮蔽が十分ではないことが多く、低い濃度までの測定が難しい。

食品に限った簡易的な測定を行うのであれば、ＮａＩシンチレーション検出器が、より高度な分析や低い濃度での測定を行う必要があるときはＧｅ半導体検出器が採用されている。このため、測定専門の機関ではＧｅ半導体検出器を用いていることが多く、市民団体や自治体などが購入して、個人からの測定依頼に応じているときはＮａＩシンチレーション検出器を導入していることが多い。前者は「精密測定」、後者は「簡易測定」と呼ばれているが、測定対象が食品であって、放射性セシウムを測定することが目的の場合はＮａＩシンチレーション検出器でも十分である。

どちらの測定器でも、測定器自体を汚染させてはならない。測定器が汚染すると、検出できる放射性物質の濃度が高くなり、正確な値が得られなくなる。また、測定器の汚染を除去することも容易ではない。汚染レベルが高いと思われる測定試料を取り扱うときや多数の試料を測定するときは、測定試料を 2 重のポリ袋などに入れるような注意が必要である。

なお、遮蔽状況や測定器の汚染の有無、信号処理回路の安定性などを確認するため、定期的にバックグランドスペクトルを確認することも重要である。Ｇｅ半導体検出器を用いたときのバックグランドスペクトルの例を図 37 に示す。この例ではほとんどガンマ線が検出されていない。

また、試料容器や形状は校正したときと同じ条件にそろえることが重要である。容器の形状や材質が異なると、測定効率に差が生じるため、得られる結果も正確ではなくなる。

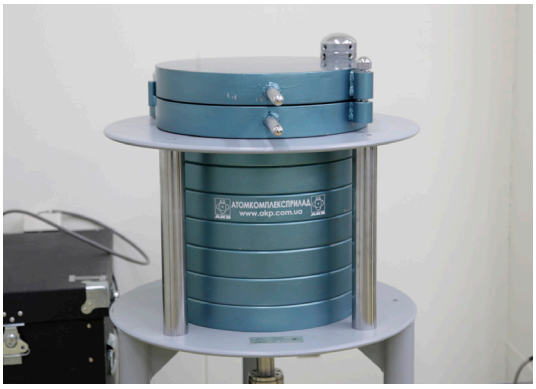
▲写真 7　豚肉の下処理の様子

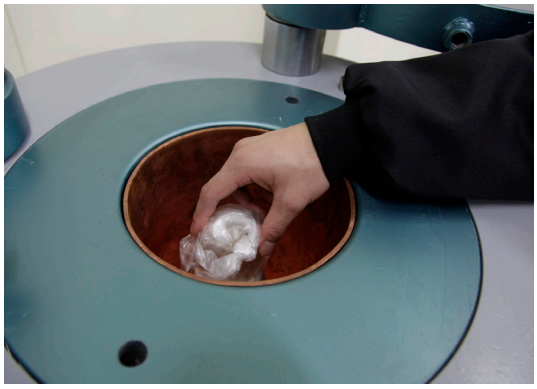
▲写真 8　ゆずの下処理の様子

▲写真 9　左がマリネリ容器　右が U-8 容器

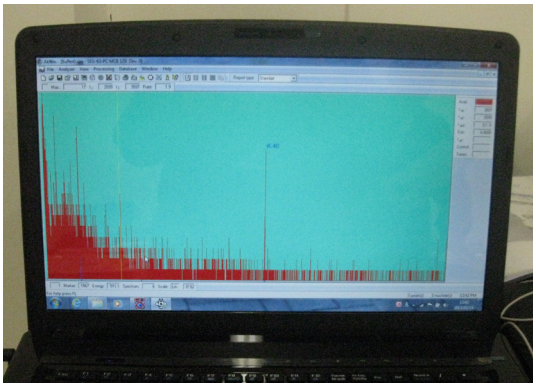
▲写真 10　試料は隙間なく、決められた容器の高さまで充填する′

▲写真 11,12　NaI ヨウ化ナトリウムシンチレーション検出器

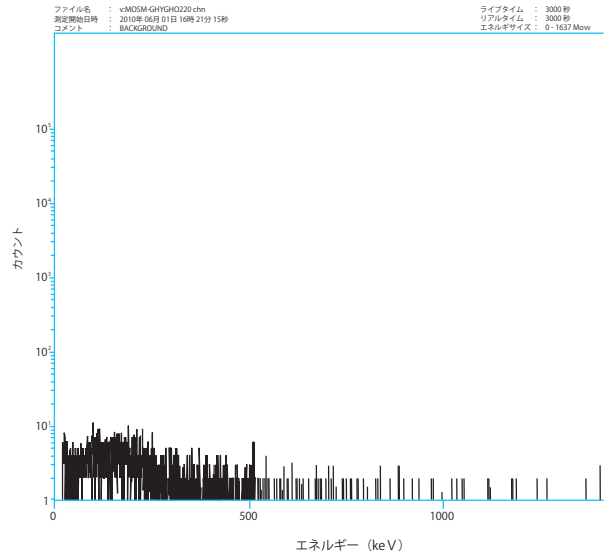




▲写真 13,14　Ge ゲルマニウム半導体検出器　10cm の厚い鉛で遮蔽している　U-8 容器は小さいので中央に置く



▲写真 15　Ge ゲルマニウム半導体検出器　測定中のディスプレイ

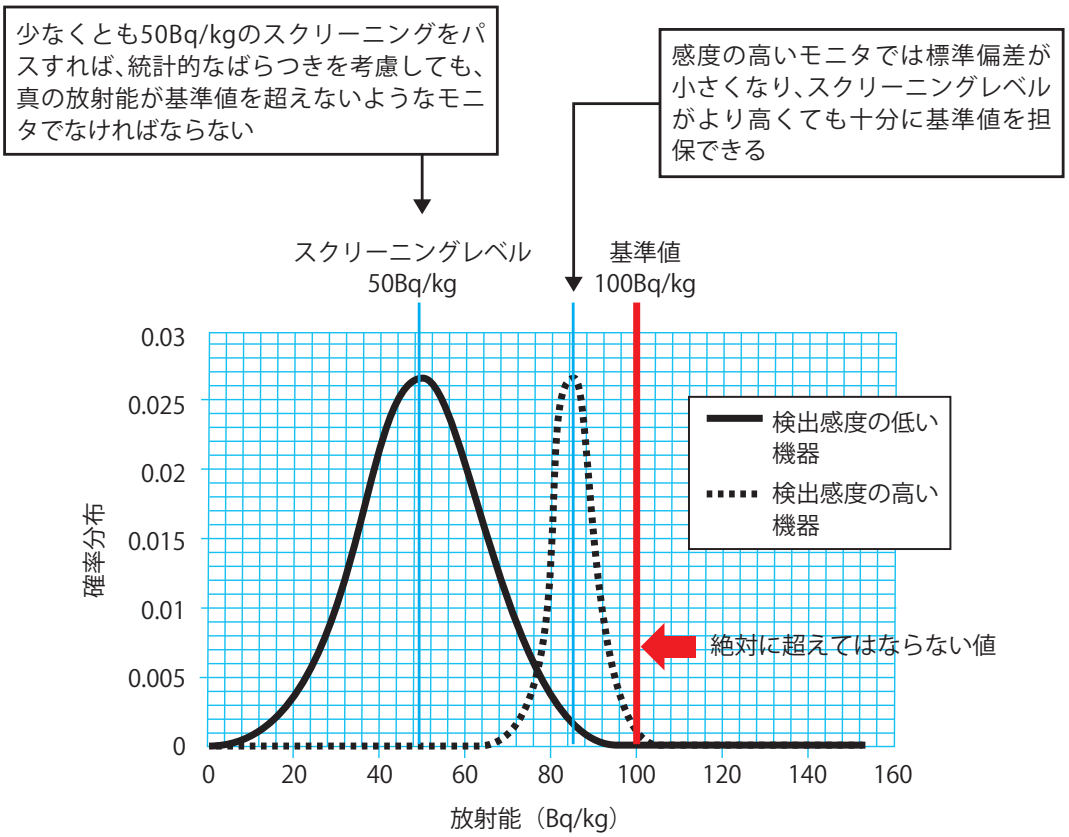


▲図 37　バックグラウンドスペクトルの例（Ge 半導体検出）

■スクリーニング

食品用放射能測定装置は一般食品のスクリーニング検査を行うことを目的とし、食品衛生法の規格基準としての食品中の放射性セシウムスクリーニング法が規定する性能要件を満たす必要がある。

例えば基準値 100Bq/kg に対し、スクリーニングレベルの下限値として 2 分の 1 の 50Bq/kg を求められている。これは、スクリーニングレベル以下であることを装置で確認できれば、その食品の放射能は基準値を超えないとする考え方によるものである。少なくとも 50Bq/kg のスクリーニングをクリアすれば、統計的なばらつきを考慮



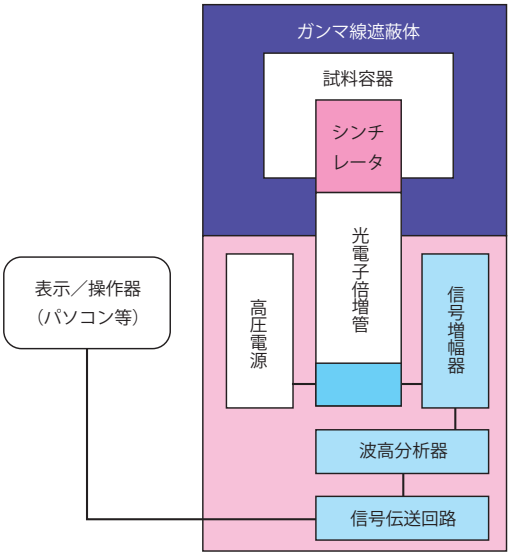
▲図 38　食品中の放射能基準値とスクリーニングレベル

しても、試料の放射能が基準値を超えることはないような装置でなければならない。これは最低限の性能要件で、感度が高く、標準偏差の小さい装置では、より高いスクリーニングレベルでも基準値を超えることはない場合もある。

一方、測定下限値については基準の 4 分の 1 である 25Bq/kg 以下が要求されている。**測定下限値**とは、試料計数率からバックグラウンド計数率を引いた正味計数率が、その標準偏差の 3 倍を超える値として定義され、食品用放射能測定装置の性能判断の指標となる。測定値の変動幅は標準偏差で表すことができるが、標準偏差の 3 倍というのは真の値の 99.7% がこの範囲に含まれることを意味している。すなわち、正味計数率が真の値の 99.7% 以上であればその値は有効と判断される。この測定下限値は検出器の大きさのみではなく、環境中のガンマ線バックグラウンドレベル、機器の遮蔽厚、試料の幾何学的配置、測定時間の影響を受ける。食品用放射能測定装置は一般食品のスクリーニング検査を行うことを目的とし、食品衛生法の規格基準としての食品中の放射性セシウムスクリーニング法が規定するこれらの性能要件を満たす必要がある。

(2) 食品用放射能測定装置の構造

一般的な食品用放射能測定装置は、環境からのガンマ線バックグラウンドを低減させるガンマ線遮蔽体、試料の幾何学的形状を一定にする試料容器、試料からのガンマ線を検出する放射線検出器（シンチレータと光電子増倍管）、光電子増倍管を動作させる高圧電源、放射線検出器からの計数パルス信号を増幅する信号増幅器、計数パルス信号をパルスの最大電圧（パルス波高）ごとに分ける波高分析器、そしてそのデータを外部に伝送する信号伝送回路から構成されている。外部に送られたデータはパソコン等に取り込まれ、パルス波高ごとに整理された棒グラフとなる。この棒グラフの横軸目盛をガンマ線エネルギーに換算する処理はエネルギー校正と呼ばれ、ガンマ線エネルギー単位で横軸に書かれた棒グラフはガンマ線エネルギースペクトルと呼ばれる。



▲図 39　食品用放射能測定装置の構造

エネルギー校正は食品用放射能測定装置の性能維持において最も重要な役割を果たす。それは、周辺温度の影響によりシンチレータの発光量や光電子増倍管の増幅率が変動する場合があるためである。これらが変動すると、横軸目盛とガンマ線エネルギーの関係が変化してしまう。そのため、変動を自動的に補正する機能を持った機器も存在するが、多くは、温度の影響を受ける。したがって、室温は一定であることが望ましく、夜間に空調を停止するような環境では毎朝、機器の温度が安定してから増幅率の再確認が不可欠である。最も簡単に増幅率変動を確認する方法は、Cs-137 の動作確認用線源あるいは標準線源を用いて、662keV ガンマ線の光電ピーク位置の変化を見るものである。放射性セシウムが入手できないときは、塩化カリウム試薬を試料容器に入れて天然に含まれる K-40 の 1,462keV ガンマ線の光電ピーク位置変動で確認してもかまわない。

エネルギー校正がしっかりとなされている場合、測定に大きな誤差を与える要因は容器への試料の詰め方である。効率校正のための標準ガンマ体積線源は、酸化アルミニウム等の密度が 1 に近い物質が試料容器いっぱい詰まったものを使用している。測定試料はできるだけこの標準ガンマ体積線源に近い状態で、隙間なく詰めることが大切である。

(3) 食品放射能測定装置の概要

一般食品を対象とする食品用放射能測定装置は、大別すると、測定対象ごとに試料を容器に入れて測定する個別スクリーニング装置と測定対象をそのまま測定する連続スクリーニング装置の 2 種類に分けられる。いずれも測定対象は Cs-134 と Cs-137 で検出器には全てシンチレータが採用されている。

シンチレータは主として Na(Tl) 結晶や CsI(Tl) 結晶が用いられているが、実効原子番号の大きい CsI(Tl) 結晶の方がやや有利である。しかし、光電子増倍管と光学的関係から、計数効率でみると大きな差はない。

ガンマ線の光電ピークは Cs-137 の 662ekv と、Cs-134 の 569keV、605keV ならびに 796keV が測定対象となるが、シンチレータのエネルギー分解能の悪さから 569keV、605keV、662keV を正確に分離することは困難である。さらに、基準値の 100Bq/kg は Cs-134 と Cs-137 の合計について設定されているので、個別の放射性核種に分けて測定する必要はない。「食品中の放射性セシウムスクリーニング法」においても機器換算係数 (Bq/cps) は Cs-137 標準線源を用いて決定することになっており、Cs-134 からのガンマ線も Cs-137 として計算される。放出割合の違いから得られた放射能濃度は実際の合計値よりも高くなるが、スクリーニング法では過大評価（正のバイアス）が許容されていることに加え、2 年の半減期しかない Cs-134 は減衰が早いため、大きな問題にはならない。

装置によっては重なりあった光電ピークをフィッティング解析によって推測し、Cs-134 と Cs-137 に分けて放射能濃度表示を行っているものもあるが、基準値自体が合算された値なので、この装置では基準値との比較の際にフィッティング時の誤差と課参事の誤差を余分に含むことになる。特に低計数率時には大きな誤差を招くことがある。

事後直後の Cs-137 と Cs-134 の放射能比は実測値でほぼ 1:1 であった。そのため、独立ピークとして識別できる Cs-134 と Cs-137 の 796keV ガンマ線のみを計測して、Cs-137 を測定せずに、1:1 の値を半減期補正することにより Cs-134 と Cs-137 を分離

表示させる装置も存在するが、推定された初期値に基づく方法は測定器として好ましいものではない。

通常は、両核種の主たる光電ピークが存在する 569~796keV 間の領域にシンチレータのエネルギー分解能を考慮した 30keV 程度の領域両端に加えた、540~830keV 間をエネルギー範囲にすることで測定の最適化を図ることができる。

計数効率：検出器に入ってきた放射線の数と、信号として取り出せた数の比

放出割合：崩壊ごとに放出されるガンマ線の割合（%）

●食品中の K-40

K-40 から放出される 1,461keV のガンマ線は、放射性セシウムからのガンマ線よりもエネルギーが高く、このガンマ線がシンチレータにぶつかるとエネルギーが低下したガンマ線として広く分布してしまう。これは放射セシウムのガンマ線を計測している領域にもなだれ込み、結果として真の放射性セシウム放射能よりも高い値を示している。そのため、カリウムの多い食品を計測する場合には、過大評価している可能性を念頭に置く必要がある。

■個別スクリーニング装置

市場に最も多くの種類が出回っているのがこの装置で、海外製品も少なくない。基本的な構成は図 39 と同じ。ガンマ線遮蔽材の材質や厚さ、検出器の種類に差がある。

福島原発事故後、検出器に NaI(Tl) シンチレータを使用している暫定規制値対応の食品用放射能測定装置として最初に発表された日米合作の装置や、その後、新基準に対応するために新たに設計がなされた装置がある。放射性セシウムのみのスクリーニングに特化することからエネルギー分析を行わず、全放射性セシウムエネルギー領域について計数する方式を採用している。検出器としては実効原子番号の小さいプラスチックシンチレータを使用しているが、幾何学的条件を圧倒的に改善できる井戸型形状を採用しており、検出器内に試料を挿入して計測する。

■連続スクリーニング装置

一般食品の全量スクリーニング検査を目的とする大型機器で、ベルトコンベアと食品放射能モニタを一体化させることにより連続スクリーニング処理ができるようになっている。

当初の対象製品は米で、30kg 入り米袋を 1 分間に 4~7 袋検査する能力を持っている。使用している検出器はメーカの設計思想によって異なり、NaI(Tl) シンチレータ以外に、効果ではある者の計数効率が高い BGO シンチレータ、計数効率は低いものの大型化が容易で高いい幾何学的効率を得やすいプラスチックシンチレータ、発光波長が PIN フォトダイオードの有感波長帯域内にあり、高価な光電子増倍管を使用しなくても放射線検出が可能な CsI(Tl) シンチレータなどが用いられている。この中で BGO シンチレータを使用しているものは温度依存性が大きく、一定の温度条件下で測らなければ、測定中に感度が変化してしまう可能性もある。放射能の検出能力は検出器の検出効率が高いほど大きく、検出効率は機器効率と幾何学的効率の積に比例する。

この連続スクリーニング装置の大きな特徴は、ベルトコンベアで搬送されてきた測定対象物をトンネル構造やシャッター構造を持った遮蔽体で覆い、その中を移動中に放射能測定を行う点にある。

■食品を検査するその他の装置

一般食品以外の食品では、前記のスクリーニング法は適用されない。

例えば、飲料水の場合、放射能濃度の新たな基準値は 10Bq/kg と低く、使用可能な食品用放射能測定装置は検出限界の低い Ge 半導体検出器型に限られる。

水道事業者は 1 か月に 1 回以上検査を行うことが義務付けられ、かつ、「水道水等の放射能測定マニュアル」により、1Bq/kg の検出限界を担保することが求められている。そのため、多くの検査機関で水道水検査のための Ge 半導体検出器の整備が進められた。これらは、食品用放射能測定装置として新たに開発されたものではなく、従来の放射能分析装置が用いられている。

Ge 半導体検出器を用いた装置は、シンチレーション検出器を用いたものと基本構成に大差はないが、-190℃程度に検出器を冷却する必要があるため、液体窒素冷却システムか電気冷却システムが不可欠である。しかし、高いエネルギー分解能を持つことから、特定の放射性核種が放出するガンマ線を高精度に弁別でき、結果として低い測定下限値を達成している。表は「緊急時における食品の放射能測定マニュアル」の表 10 に示された Ge 半導体検出器（相対効率 15%）による計測時間と検出限界の関係で、環境中に事故起源の多核種が存在しない状況では、I-131、Cs-137 ともに 1 時間計測で約 1Bq/kg の検出限界を持つことが分かる。

乳幼児用食品や牛乳を対象とした放射能モニタでも多くは Ge 半導体検出器を採用しているが、価格対効果比を考えるとシンチレーション検出器型を用いる場合もある。しかし、実用的なスクリーニング時間で計測するためには、鉛遮蔽厚が 50mm 以上、検出器に直径 76mm ×長さ 76mm（3 インチ× 3 インチ型）の NaI(Tl) シンチレータを用いた放射能モニタが必要になる。代表的な機器では 1,000 秒測定で 4~6Bq/kg までの検出限界が確保されている。

▼表 10　Ge 半導体検出器（相対効率 15%）による計測時間と検出限界

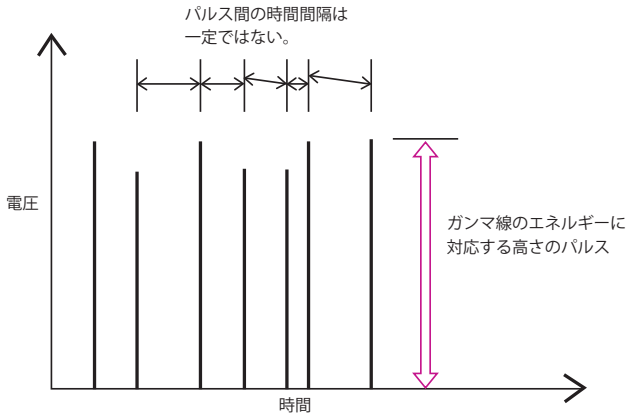
試料名	検査試料	Cs-137 検出限界		Cs-137 検出限界		単位
	2L マリネリ容器入り	1 時間測定	10 時間測定	1 時間測定	10 時間測定	
牛乳	2L	0.4	0.2	0.8	0.3	Bq/L
野菜（葉菜）	1kg	0.8	0.4	1.6	0.5	Bq/kg 生
海藻・魚	2kg	0.4	0.2	0.8	0.3	Bq/kg 生
穀類・肉類・卵	2kg	0.4	0.2	0.8	0.3	Bq/kg 生

Q9　線量率測定ができるサーベイメータで食品を測定できないのか？

放射線の量を測定するサーベイメータでは周辺からの放射線の量を測定できるような構造となっているので、食品からの放射線のみを測定することはできない。また、指示できる値は線量率（μ Sv/h）単位であるため、この値を放射性物質の濃度 (Bq/kg) への換算はできない。なお、暫定規制値レベルの測定をするには一般的なサーベイメータでは感度が低く実用的ではない。

3. ガンマ線のスペクトル

Ｇｅ半導体検出器を用いると、検出器内部にはじき出された電子とそれによってできる空隙である正孔が生じる。生成した電子は測定素子の中で自由に動くので、これを捕らえることによって、入射したガンマ線のエネルギーに対応する高さのパルスが得られる。図 40 にパルスの模式図を示す。

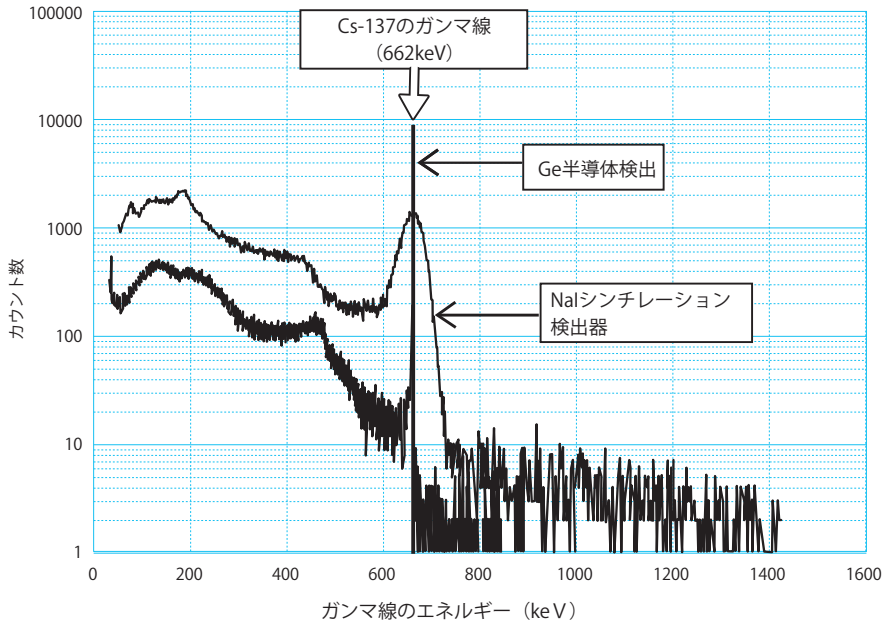


▲図 40　検出器から得られるパルスの例

また、ＮａＩシンチレーション検出器でも検出器内部で発生した蛍光を増幅すれば、Ｇｅ半導体検出器と同じように入射したガンマ線のエネルギーに相当するパルスが得られる。

これらのパルスの高さを波形弁別器（パルスハイトアナライザ：略してＰＨＡとも）を用いると、横軸にガンマ線のエネルギー、縦軸にそのエネルギーに対応する計数値が得られる。このようにして得られたグラフをガンマ線スペクトルという。このスペクトルを解析すると、いろいろなエネルギーのガンマ線が入射したとき、放射性物質の種類ごとに分類してそれぞれの濃度を算出することができる（＊注）。

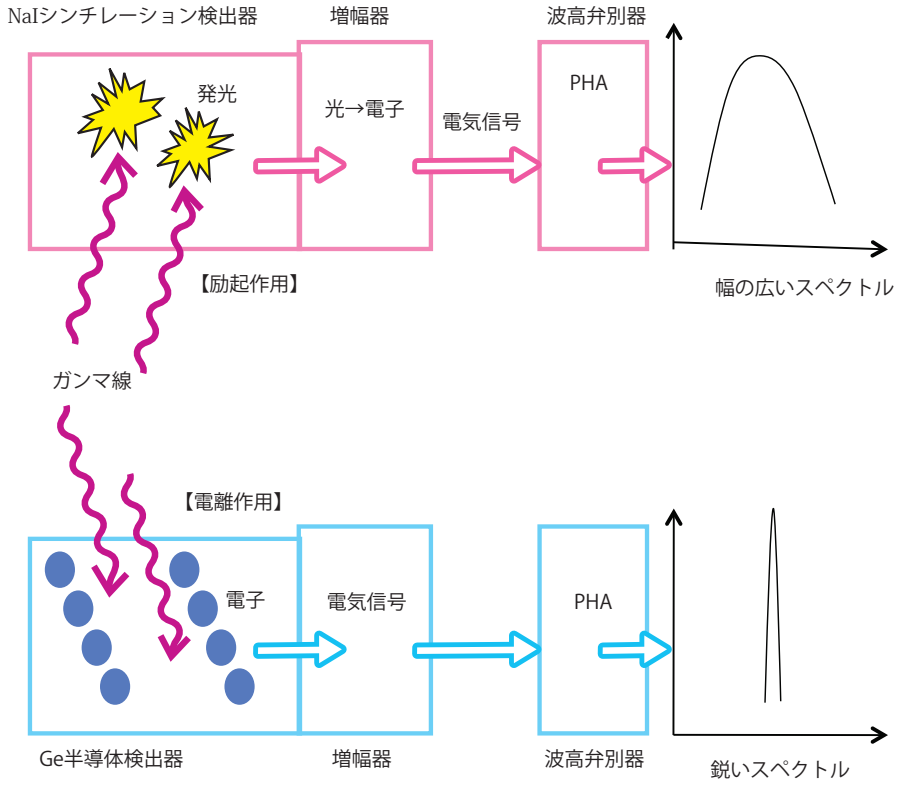
＊注：スペクトルによる放射性物質の定量は、液体クロマトグラフを用いた化学物質の定量によく似ている。



▲図 41　ガンマ線スペクトルの比較（Cs-137）

Cs-137 を測定したときのスペクトル例をＧｅ半導体検出器とＮａＩシンチレーション検出器とをあわせて図 41 に示す。この図から、ＮａＩシンチレーション検出器に比べてＧｅ半導体検出器を用いると Cs-137 が放出するガンマ線（661keV）が鋭いピークとして得られていることが分かる。図 42 にＧｅ半導体検出器とＮａＩシンチレーション検出器にガンマ線が入射したときの様子を示す。Ｇｅ半導体検出器では素子中の電子を直接捕らえて、増幅するため、鋭いピークを持つスペクトルが得られる。一方、ＮａＩシンチレーション検出器では蛍光を電気信号に変換して増幅するための増幅器（光電子増倍管という）での「ゆらぎ」によって、幅の広いスペクトルになる。

Ｇｅ半導体検出器ではピークの幅が狭いことから、ガンマ線のエネルギーを正確に弁別することができるため、放射性物質の種類を分類して濃度を求めることが可能になる。しかし、ＮａＩシンチレーション検出器であっても、図 41 のように、Cs-137 のガンマ線の形は保存できているため、食品の放射性物質濃度測定であれば十分に使用できる。



▲図 42　Ge 半導体検出器とＮａＩシンチレーション検出器の比較

4. 食品中放射性物質の暫定規制値

「暫定規制値」は緊急時の対応として、「一時的な暫定を決めて安全を確保する」ために、平成 23 年 3 月 17 日に厚生労働省が設定したものである。飲料水や穀物、野菜などに 5 種類に分けてそれぞれに 1mSv ずつ割り振って、おのおのの食品の放射性セシウム濃度を暫定的に決めた（＊注）。この濃度に相当する 5 種類の食品を 1 年間にわたってずっと飲食したときに、最大で 5mSv に相当する内部被ばくを受ける。以上のように、個々の食品に 1mSv ずつとしたことにより被ばく線量が 5mSv を超えることはない。

実際には暫定規制値の濃度で飲食することは考えられない。また、たとえば穀物が暫定規制濃度を超えた場合でも人体影響が現れることはほとんどないと考えて良い。しかし、厚生労働省はより安全となるよう、暫定規制値を超えたものは市場に流通させないように自治体に指示している。

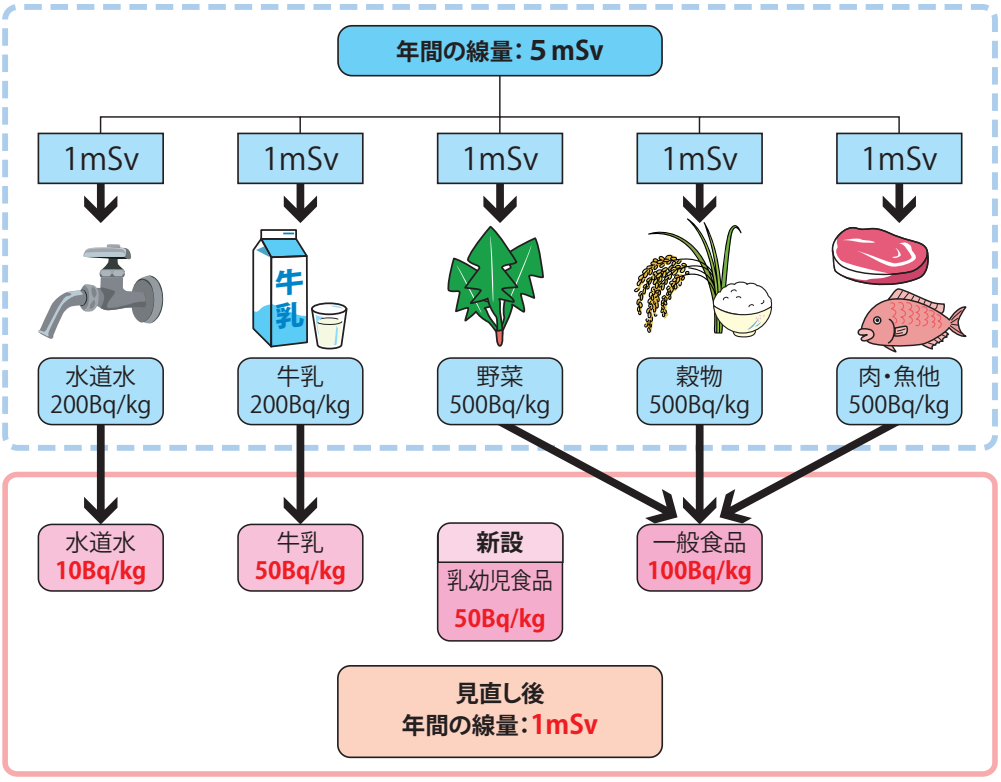
この暫定規制値は平成 24 年 4 月から、現状の 5 分の 1 に低減して年間の被ばく線量を 1mSv とすることや分類見直しが検討されており、食品などの放射性セシウム濃度の暫定基準が現状より低く設定されることとなっている。先月号に述べたように、成人に比べて乳幼児の放射線影響の程度が数倍大きいと考えられている。このことから、市販の乳児用離乳食や粉ミルクなどは一般食品と区別して設定される予定である。

しかし、一般食品から離乳食を作った場合は濃度が市販品より高くなる可能性が指摘されている。

Q10　それぞれの暫定規制値はどのように改訂されたのか？

平成 23 年 3 月に設定された暫定規制値と平成 24 年 4 月以降の見直される暫定規制値は図 43 に示す通りである。見直しにより一般食品を統合して 100Bq/kg に、乳児用食品が新設され 50Bq/kg に、水道水は摂取量が多いことから以前よりかなり低くなって 10Bq/kg となった。

＊注：この暫定規制値を決めるには、乳児、幼児および成人の 3 区分の年齢別に 1mSv に対応する濃度を求め、各年代での最低濃度を暫定規制値として採用した。食品の種類によっては年代ごとに摂取量が違うので、必ずしも乳児で低い放射性物質濃度となっているわけではない。なお、見直しするときには、男女年齢別に 10 の群に分け、それぞれの群での最低濃度を切り下げて、きりの良い数値として設定されることになっている。



▲図 43　放射性セシウムの暫定規制値と新基準値

5. 食品放射線量の測定実習

1. 実習の目的

・食品中の放射線量

（事故由来の放射能　　対象核種：**Cs134**、**Cs137**）の測定と評価

2. 準備

【測定サンプル】　玄米　ゆず

【下準備】

・ゴム手袋
・サンプル用ビニール袋
・まな板（紙製）
・試料容器（紙製）
・カッターの刃
・スプーン（プラスチック製）
・タグ

3. 測定器

Ge（ゲルマニウム） 半導体検出器	**名称**	NaI(ヨウ化ナトリウム） シンチレーション検出器
AKP(Atom Komplex Prylad) 社製	**製造**	ベルトールドジャパン株式会社製 LB2045
ゲルマニウム半導体検出器	**検出器**	ヨウ化ナトリウム（タリウム） シンチレータ 2 インチ
100mm	**鉛シールド厚**	50mm
8192ch	**チャンネル数**	1024ch
ガンマ（γ）線	**測定線種**	ガンマ（γ）線
0.1Bq/kg	**検出限界値**	1Bq/kg ※ 10 時間以上の測定が必要 ※ 30 分程度の測定では 10Bq/kg 程度になります
0.4% (FWHM)	**エネルギー分解能**	7.5% (FWHM)

4. 測定の手順

玄米

① サンプル容器の重さを測定する。 g

② 玄米をサンプル容器に入れる。

③ 試料の重さを測定し、玄米の重さを算出する。 g

④ 測定器に試料をセットして、測定を開始する。

⑤ 測定が終了したら、データをプリントし、評価へ

ゆず

① サンプル容器の重さを測定する g

② ゆずをまな板の上にのせ、カッターで細かく切る。

③ ゆずをサンプル容器に入れる。

④ 試料の重さを測定し、ゆずの重さを算出する。 g

⑤ 測定器に試料をセットして、測定を開始する。

⑥ 測定が終了したら、データをプリントし、評価へ

※ 下処理での注意事項

汚染がある場合を想定し、以下の事項に注意する。

・測定器、PC の操作、棚類に触れるときは手袋を外す。
・手袋をしたまま、むやみに体に触れない。
・サンプルの取り違えがないこと。
・試料は隙間なく容器に詰めること

5．測定器の操作（マニュアル）

① Ge ゲルマニウム半導体検出器

（1）バックグラウンドの確認

イ　遮へい体内部には何も入っていないことを確認する。

ロ　AkWin 画面のツールバーで Start をクリックし測定を開始し、
3600 秒程度で Stop をクリックし、停止する。

ハ　AkWin 画面のツールバーで Background Control をクリックし、
メッセージを確認する。

- O.K. であればそのままサンプル測定へ
- NG であれば、再度バックグラウンドを確認し、
必要な場合はバックグラウンドを再登録する。

（2）サンプルの下処理

→行程（手順）シートを参照

（3）サンプルの測定

イ　AkWin 画面のツールバーで Properties をクリックし、ウィンドウを開く。

ロ　Processing をクリックし、容器に適した Measurement Line を選択する。

ハ　Sample をクリックし、試料重量、Geometry、Comment を入力する。

ニ　Analyzer をクリックし、測定時間を設定する。

ホ　Properties を閉じる。

ヘ　AkWin 画面のツールバーで Start ボタンをクリックし、測定を開始する。

（4）結果解析

イ　AkWin 画面のツールバーで Activity をクリックし、
Protocol ボタンにて濃度結果表を確認する。

ロ　AkWin 画面のツールバーで Printer ボタンをクリックし、結果を出力する。

② NaI（ヨウ化ナトリウム）シンチレーション検出器

（1）バックグラウンドの確認

イ　遮へい体内部には何も入っていないことを確認する。
ロ　測定器のメインメニューから Measurement を押す。
ハ　パネルで表示されている核種が「Total」であることを確認する。
ニ　測定時間を 3600 秒に設定し、Start ボタンを選択し、開始する。
ホ　PC にて J-Gamma メニューの「LB2045 の単独測定」を選択する。
ヘ　結果を確認し、ＮＤであることを確認する。

（2）サンプルの下処理

→行程（手順）シートを参照

（3）サンプルの測定

イ　測定器のメインメニューから Measurement を押す。
ロ　パネルで表示されている核種が「Total」であることを確認する。
ハ　測定時間を設定し、Start ボタンを選択し、開始する。
ニ　PC にて J-Gamma メニューの「LB2045 の単独測定」を選択する。
ホ　コメント、重量を入力し、セーブを押す。

（4）結果解析

イ　プリント出力をクリックし、結果を出力する。

6. 測定結果

（1）NaI（ヨウ化ナトリウム）シンチレーション検出器による**ゆず**の測定結果

NaI (Tl)

測　定　結　果

国際情報工科大学校

ユーザー名　：　ゆず

コメント　：

重　量　：　0.449 (Kg)

測定日　：　2013/02/15 12:06:18

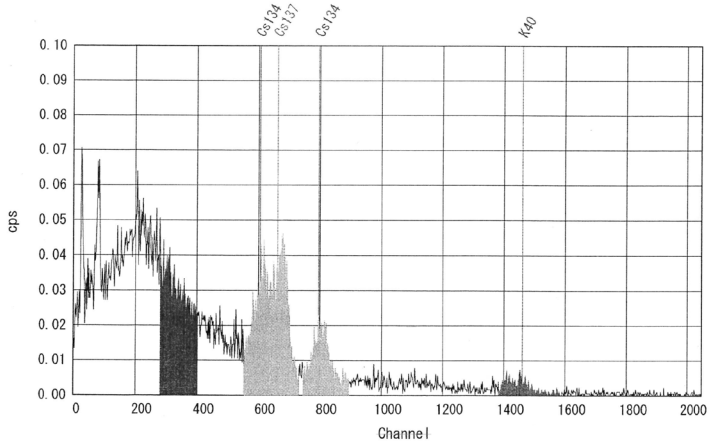
測定時間　：　1801 (秒)

バックグランド測定日 ：2013/02/14 18:41:

測定結果　　測定機器：Berthold Technologies 社製 LB2045

核種名	エネルギー (KeV)	測定値 (CPS)	測定値±誤差 (Bq)	測定値±誤差 (Bq/Kg)	検出限界 (Bq/Kg)
Cs134	796.802	0.33	17.86±4.11	39.78±9.14	6.96
Cs137	662	0.82	39.56±7.19	88.11±16.01	5.62
K40	1461	0.03	N.D.	N.D.	86.65

Cs134+Cs137　　127.89 Bq/Kg



(2) NaI（ヨウ化ナトリウム）シンチレーション検出器による**玄米**の測定結果

NaI (Tl)

測 定 結 果

国際情報工科大学校

ユーザー名 ： 玄米

コメント ：

重 量 ： 0.396 (Kg)

測定日 ： 2013/02/15 12:09:42

測定時間 ： 1800 (秒)

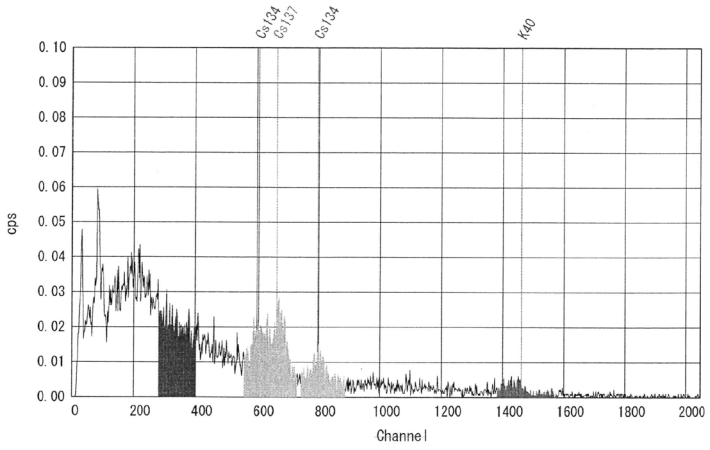
バックグランド測定日 ： 2013/02/14 18:41:

測定結果

測定機器：Berthold Technologies 社製 LB2045

核種名	エネルギー (KeV)	測定値 (CPS)	測定値±誤差 (Bq)	測定値±誤差 (Bq/Kg)	検出限界 (Bq/Kg)
Cs134	796.802	0.13	7.16±2.92	18.07±7.37	7.82
Cs137	662	0.46	22.08±5.59	55.77±14.11	6.22
K40	1461	0.01	N.D.	N.D.	98.27

Cs134+Cs137 73.84 Bq/Kg



(3) Ge ゲルマニウム半導体検出器による**豚肉**の測定結果

Ge 結果　豚肉

```
Measurement line: 0 Denta 0.13 L, Marinelli 1.0 L
Search: 1  Library dat\LIBRAB Group  4
Spectrum file name :  C:\AKWIN\GAMMA\SPA\BUFFER0.SPA
Date of measuring  2013 - 2 - 15  12:19 Keep back background of  2012 - 11 - 6
Energy calibration from  2012 - 11 - 8
```

N		Locat. peak	Energy (keV)	Intens	Error (%)	Nuclide	Activity (Bq/kg)	(Ci/kg)
1	0	730.85	238.46	9.45E-03	62.8			
2	0	1970.58	642.73	3.06E-03	91.3			
3	0	4479.29	1461.20	1.75E-02	34.1	K_40	8.12E+01	2.19E-09

```
  Measurement time :  3597.0 sec Volume(weight)=   0.138 kg Geometry  1   Denta 0.130
Ashing coefficient/multiplier  1.00E+00 ( Raw weight  1.00E+00  Cinder 1.00E+00 )
```

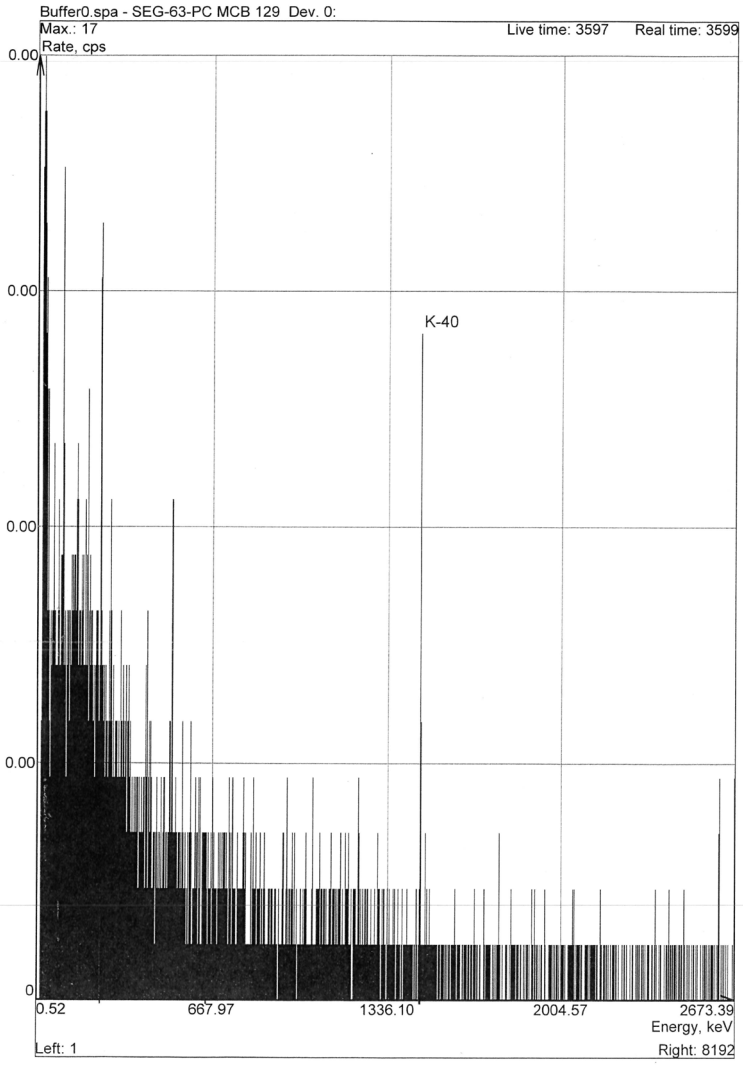
	Nuclide	T(1/2)	Act. Bq/kg	Ci/kg	Contr(%)	Rel.error(%,0.95)
1	K_40	> 999years	8.12E+01	2.19E-09	100.0	35.1

```
                                                  Intensity          2.0 imp/sec
```

```
        Calculation
 minimal-detectable activity: (rat. err= 50%, p=0.95) :
   Nuclide Act. Bq/kg     Ci/kg

1  CS_134       1.24E+00  3.36E-11
2  CS_137       1.36E+00  3.69E-11
3  K_40         4.32E+01  1.17E-09    MDA
```

Ge 結果 スペクトル　豚肉



参考・引用資料

「知っておきたい放射線のこと」文部科学省　　高校生向け副読本
「放射線の ABC」　　日本アイソトープ協会
「はじめての放射線測定」　　日本アイソトープ協会
「放射性物質の分析について」　農林水産省
「やっかいな放射線と向かい合って暮らしていくための基礎知識」
　　学習院大学　田崎教授（理論物理学者）
「これだけは知っておきたい放射能」～放射能・放射線の基礎知識～
株式会社日本環境調査研究所　泉　雄一氏　設備と管理 2012 年 3 月号掲載　オーム社刊

平成 25 年度　文部科学省
東日本大震災からの復興を担う専門人材育成支援事業

放射線の知識を持つ測定技術者の育成
及び計測支援事業

放射線測定の実際
第 2 版
発行■平成 26 年 3 月

編集・発行■放射線の知識を持つ測定技術者の育成及び計測支援事業推進協議会

問い合わせ■連絡先

学校法人 新潟総合学院
専門学校 WiZ 国際情報工科大学校
〒 963-8811　福島県郡山市方八町 2-4-15
フリーダイアル　0120-454-443
http://www.wiz.ac.jp
E-mail : wiz@nsg.gr.jp